

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA
CAMPUS DE ARIQUEMES
ENGENHARIA DE ALIMENTOS

CLEBER DO AMARAL

**CONTRIBUIÇÃO PARA A MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE
LODOS ATIVADOS EM SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM
SIMULADOR BASEADO EM EQUAÇÕES**

ARIQUEMES

2014

CLEBER DO AMARAL

CONTRIBUIÇÃO PARA A MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE
LODOS ATIVADOS EM SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM
SIMULADOR BASEADO EM EQUAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Engenharia de Alimentos da
Universidade Federal de Rondônia – UNIR, para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
de Alimentos.

Orientador: Prof. Msc. Gerson Balbueno Bicca

ARIQUEMES

2014

Dados de publicação internacional na publicação (CIP)
Biblioteca setorial 06/UNIR

A485c

Amaral, Cleber do.

Contribuição para a modelagem e simulação do processo de lodo ativado em sistema de tratamento de efluentes em simulador baseado em equações. / Cleber do Amaral. Ariquemes-RO, 2014. 56 f.: il.

Orientador (a): Prof.(a) Ms. Gerson Balbueno Bicca.

Monografia (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) Fundação Universidade Federal de Rondônia. Departamento de Engenharia de Alimentos, Ariquemes, 2014.

1. Tratamento de efluentes. 2. Lodos ativados. 3. Simulador EMSO.
I. Fundação Universidade Federal de Rondônia. II. Título.

CDU: 628.336.3


Bibliotecária Responsável: Danielle Brito Silva, CRB: 11-766.

CLEBER DO AMARAL

**CONTRIBUIÇÃO PARA A MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO
DE LODO ATIVADO EM SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES
EM SIMULADOR BASEADO EM EQUAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos, da Universidade Federal de Rondônia, no dia 9 de 12 de 2014 pela Comissão formada pelos professores:

Orientador(a):



Prof. Me. GERSON BALBUENO BICCA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA



Prof (a). Me. VERÔNICA ORTIZ ALVARENGA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA



Prof (a). Dra. TÂNIA MARIA ALBERTE

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha existência, por me dar força e coragem para que pudesse concluir mais esta etapa da minha vida.

A minha mãe Cleci que me deu completo apoio, incentivo nas horas complicadas, de desânimo e cansaço;

Aos meus amigos Pablo, Luana, Walquíria, Andreça, Graziela, Jaqueline, Jenifer, Ceres, Fernanda Lana e Márcia, companheiros de trabalho e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação pessoal e que vão com certeza continuar presentes em minha vida;

Agradeço ao Professor Me. Gerson B. Bicca, pelo auxílio, disponibilidade de tempo e material e com sabedoria e bom senso não me deixava esquecer dos detalhes;

Agradeço a Professora Dr. Tânia Maria Alberte, por ter me orientado no primeiro momento deste trabalho, pelo suporte no tempo que lhe coube, por suas correções e incentivos;

Agradeço a Professora Me. Verônica Ortiz Alvarenga, por ter sido minha primeira orientadora na graduação, por toda paciência, companheirismo e incentivos e broncas nos momentos certo;

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu obrigado.

"A força está com você, jovem Skywalker. Mas você ainda não é um Jedi"

(Darth Vader)

RESUMO

As indústrias de alimentos geram uma grande quantidade de resíduos líquidos e sólidos. Esses resíduos geram um potencial poluente por apresentarem uma porção de carga orgânica elevada, acarretando problemas de descarte final, necessitando assim de um tratamento prévio antes de serem lançados para os corpos receptores. O tratamento biológico por lodos ativados é um dos processos mais utilizados para o tratamento de efluentes domésticos e industriais caracterizados por contaminação de carga orgânica biodegradável e produtos nitrogenados. A legislação ambiental vem estipulando concentrações limites de descarte cada vez mais restritas, levando ao aprimoramento dos processos de tratamento de efluentes por lodos ativados e tornado crescente a necessidade da modelagem do processo. Devido ao tamanho e a complexidade de algumas plantas de tratamentos, a modelagem se mostra bastante viável e útil, pois se trata uma técnica não intrusiva, onde é possível se obter parâmetros e estimativas que contribuem para o aperfeiçoamento de pesquisas, para projetos de estação de tratamento, para otimização e treinamento operacional. Os modelos da família ASM têm sido aplicados em diversos *softwares* comerciais para modelagem e simulação do comportamento dinâmico de processos biológicos. Neste contexto, os objetivos deste trabalho foram, abordar o modelo ASM1, pois este, representa as reações biológicas que acontecem no interior do reator biológico, por ser amplamente utilizado e utilizar o simulador EMSO (*Environment for Modeling, Simulation and Optimization*), que é um *software* de alto desempenho, capaz de simular equipamentos ou processos que tenham sido modelados através de modelos matemáticos, criando uma interface gráfica amigável ao usuário.

Palavras-chave: Tratamento de efluentes, Lodos Ativados, Modelo ASM1, Simulador EMSO.

ABSTRACT

The food industries generate a large amount of liquid and solid waste. These residues generate a potential pollutant, because they have a lot of high organic load, causing problems of final disposal, thereby necessitating treated before being discharged to the receiving waters. The biological treatment by activated sludge processes are one of the most widely used for the treatment of domestic and industrial characterized by contamination of biodegradable organic effluent load and nitrogen products. Environmental legislation is stipulating limits concentrations of increasingly stringent discharge, leading to the improvement of wastewater treatment by activated sludge process and developed a growing need for process modeling. Due to the size and complexity of some plants of treatments, modeling proves to be quite feasible and useful, because it is a non-intrusive technique, where you can obtain parameters and estimates that contribute to the improvement of research projects for the season treatment, for optimization and operational training. Models of ASM family have been applied in many commercial software for modeling and simulation of the dynamic behavior of biological processes. In this context, the objectives of this study were to address the ASM1 model, since this represents the biological reactions that take place inside the biological reactor and be widely used and use the simulator EMSO (Environment for Modeling, Simulation and Optimization), which is a software high performance, capable of simulating equipment or processes that have been modeled using mathematical models, creating a friendly graphical user interface.

Key-words: Wastewater treatment, Activated Sludge, ASM1 model, EMSO Simulator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema das unidades da etapa biológica do sistema de tratamento por lodos ativados	17
Figura 2 – Esquema das unidades da etapa biológica do sistema de lodo ativado de fluxo contínuo	22
Figura 3 – Reator com circulação de sólidos (Sistema de lodos ativados).	24
Figura 4 – Interface Gráfica do Simulador EMSO.	44
Figura 5 – Guia <i>Explorer</i>	45
Figura 6 – <i>Palette</i> com os ícones que formam o sistema de tratamento de efluentes. .	46
Figura 7 – Conexões entre os elementos do Sistema.	46
Figura 8 – Propriedades de Entrada dos Efluentes.	47
Figura 9 – Misturador de três entradas.	47
Figura 10 – Divisor de 2 saídas.	48
Figura 11 – Tanque Misturador.	48
Figura 12 – Tanque com aeração.	48
Figura 13 – Aerador.	49
Figura 14 – Decantador.	49
Figura 15 – Bomba.	50
Figura 16 – Sobrenadante - Efluentes Tratados.	50
Figura 17 – Descarte de lodo do sistema.	51
Figura 18 – Resultados da simulação de uma planta de pequeno porte.	51
Figura 19 – Notação matricial do modelo ASM1.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes de caracterização das águas residuárias.	32
Tabela 2 – Coeficientes estequiométricos do modelo ASM1.	34
Tabela 3 – Parâmetros cinéticos do modelo ASM1.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASM1	Activated Sludge Model N.º 1
ASM2	Activated Sludge Model N.º 2
ASM3	Activated Sludge Model N.º 3
AQUASIM	Aquatic Search e Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology
ASIM	Aquatic Search; Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology
ALSOC	Ambiente Livre para Simulação, Otimização e Controle
BioWin	EnviroSim Associates LTD
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
EMSO	Environment for Modeling, Simulation and Optimization
EFOR	Emolet Data e Technical University of Denmark
GPS-X	Hydromantis
IWA	International Water Association
OAF	Organismos acumuladores de fósforo
OOP	Object-oriented programming
RAFAs	Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente
SIMBA	Institut für Automation und Kommunikation
UNIR	Universidade Federal de Rondônia
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
WEST	IBM Bélgica and Flemish Governmental Agency for Science and Technology

LISTA DE SÍMBOLOS

S_{ALK}	Alcalinidade
$X_{B,H}$	Biomassa heterotrófica
$X_{B,A}$	Biomassa autotrófica
S_0	concentração de DBO afluente
S	concentração de DBO efluente
X	concentração de sólidos em suspensão no reator
X_0	concentração de sólidos em suspensão no afluente
X_e	concentração de sólidos em suspensão no efluente
X_r	concentração de sólidos em suspensão do lodo excedente
S_O	Concentração de oxigênio dissolvido no reator
$K_{O,A}$	coeficiente de saturação de oxigênio para organismos autotróficos
K_{NH}	coeficiente de saturação de amônia para organismos autotróficos
K_X	coeficiente de saturação para substrato lentamente biodegradável
K_S	coeficiente de saturação para organismos heterotróficos
$K_{O,H}$	coeficiente de saturação de oxigênio para organismos heterotróficos
K_{NO}	coeficiente de saturação de nitrato para heterotróficos
X_I	Componentes de caracterização das águas residuárias Material orgânico particulado inerte
η_g	fator de correção para μ_H sob condições anóxicas
η_h	fator de correção para hidrólise sob condições anóxicas
f_p	Fração de biomassa que resulta em produtos particulados
S_I	Material orgânico solúvel inerte
μ_A	máxima taxa de crescimento específico da biomassa autotrófica
i_{xb}	Massa N/massa DQO na biomassa

i_{xp}	Massa N/massa em DQO de produto de biomassa
μ_H	máxima taxa de crescimento específico da biomassa heterotrófica
K_h	máxima taxa específica de hidrólise
S_{NO}	Nitrogênio na forma de nitrato
S_{NH}	Nitrogênio na forma NH^{4+} e NH^3
S_{ND}	Nitrogênio orgânico solúvel biodegradável
X_{ND}	Nitrogênio orgânico particulado biodegradável
X_P	Produtos particulados originados pelo decaimento da biomassa
Y_a	Rendimento heterotrófico (massa celular formada DQO/DQO oxidada)
Y_h	Rendimento heterotrófico (massa celular formada DQO/DQO oxidada)
S_S	Substrato prontamente biodegradável
X_S	Substrato lentamente biodegradável
b_H	taxa de decaimento da biomassa heterotrófica
b_A	taxa de decaimento da biomassa autotrófica
K_a	taxa específica de amonificação
Q	vazão de alimentação
Q_r	vazão de recirculação
Q_{ex}	vazão de lodo excedente
V	volume do reator

LISTA DE CÓDIGOS

Código B.1 – Exemplo de FlowSheet	58
---	----

SUMÁRIO

1	Introdução	16
1.1	Motivação do Trabalho	18
1.2	Objetivos	18
1.3	Estrutura do trabalho	19
2	Sistemas de tratamento de efluentes por lodos ativados	20
2.1	Sistemas de tratamentos anaeróbios	20
2.2	Sistemas de tratamento aeróbios	20
2.2.1	Lodos Ativados	21
2.2.2	Variantes dos processos de Lodos Ativados	23
2.2.2.1	Sistema de lodo ativado convencional	23
2.2.2.2	Sistema de lodo ativado com aeração prolongada	23
2.2.2.3	Sistema de lodo ativado de fluxo intermitente (Batelada)	23
2.2.3	Reator com decantação e com recirculação	24
2.3	Legislação ambiental aplicada à indústria de alimentos	25
2.4	Simuladores disponíveis no mercado	25
3	Modelo Activated sludge Model Nº. 1 (ASM1)	29
3.1	Modelos matemáticos	29
3.2	Descrição do Modelo Activated sludge Model Nº. 1 (ASM1)	30
3.2.1	Componentes de caracterização das águas residuárias	30
3.2.2	Caracterização das substâncias orgânicas	33
3.2.3	Caracterização das substâncias nitrogenadas	33
3.2.4	Coeficientes Estequiométricos	34
3.2.5	Parâmetros Cinéticos	34
3.2.6	Processos ocorrentes no Modelo ASM1	34
3.2.6.1	Crescimento aeróbio de biomassa heterotrófica	35
3.2.6.2	Crescimento anóxico da biomassa heterotrófica	37
3.2.6.3	Crescimento aeróbio da biomassa autotrófica	37
3.2.6.4	Decaimento das biomassas heterotrófica e autotrófica	37
3.2.6.5	Amonificação do nitrogênio orgânico solúvel	38
3.2.6.6	Hidrólise do material orgânico lentamente biodegradável	38
3.2.6.7	Hidrólise do nitrogênio orgânico	39
3.2.7	Limitações do Modelo ASM1	39
4	Implementação do Modelo ASM1 no Simulador EMSO	41
4.1	Biblioteca de Código do Modelo ASM1	41
4.2	Apresentação do Simulador EMSO	41
4.2.1	Linguagem de modelagem	42

4.2.1.1	Model	42
4.2.1.2	FlowSheet	43
4.2.2	Estrutura Baseada em Equações	43
4.2.3	Análise de Consistência	43
4.2.4	Solvers	44
4.2.5	Interfaces Externas	44
4.3	Interface Gráfica do Simulador EMSO	44
4.3.1	Descrição do Elementos da Interface Gráfica	46
4.3.1.1	Entrada de Efluentes	46
4.3.1.2	Misturador de três entradas	47
4.3.1.3	Divisor de duas entradas	47
4.3.1.4	Tanque Misturador	47
4.3.1.5	Tanque aerado	48
4.3.1.6	Aerador	49
4.3.1.7	Decantador	49
4.3.1.8	Bomba	50
4.3.1.9	Efluentes	50
4.3.1.10	Lodo	50
4.3.2	Sistema Considerado para a Simulação	51
5	Conclusão	52
	Referências	54
	 Anexos	 56
ANEXO A	Anexo 1	57
A.1	Notação Matricial do Modelo ASM1.	57
ANEXO B	Anexo 2	58
B.1	Exemplo de um FlowShet	58

1 INTRODUÇÃO

A descoberta de novas tecnologias e principalmente a chegada das indústrias proporcionaram um grande avanço em termos de desenvolvimento. Porém a chegada em maior escala destas, não trouxe apenas benefícios, um dos malefícios que as indústrias trouxeram foram à quantidade de poluição que estas emitem para o meio ambiente.

As indústrias de alimentos geram uma grande quantidade de resíduos líquidos e sólidos. Esses resíduos geram um potencial poluente, por apresentarem uma porção de carga orgânica elevada, acarretando problemas de descarte final, necessitando assim de um tratamento prévio antes de serem lançados para os corpos receptores.

Esse tratamento aumenta o preço do resíduo surgindo à necessidade em equilibrar os ganhos econômicos com a sustentabilidade ambiental.

As modificações na legislação ambiental, com adoção de limites de descarte mais restritos e com a conscientização da sociedade em relação ao meio ambiente, tornou-se necessário a criação e utilização de meios para remover os nutrientes e diminuir a carga orgânica presentes nos efluentes, de forma eficaz e com baixos custos.

O processo de lodo ativado tem sido empregado em tratamento de efluentes domésticos e industriais desde a década de 1930, é um processo de tratamento de águas residuárias que se destaca e tem sido amplamente utilizado, devido, ao fato de ser facilmente aplicável a efluentes cuja remoção de carga segue cinética de primeira ordem e por permitirem redução da carga poluidora até limites de lançamento com custos moderados ALBERTE (2003).

Os projetos de estações para o tratamento desses efluentes com lodo ativado, foram realizados de maneira empírica durante aproximadamente três décadas.

Este processo é constituído basicamente por uma corrente de entrada, um tanque de aeração e um sedimentador com uma corrente de reciclo de lodo, como é apresentado na Figura 1.

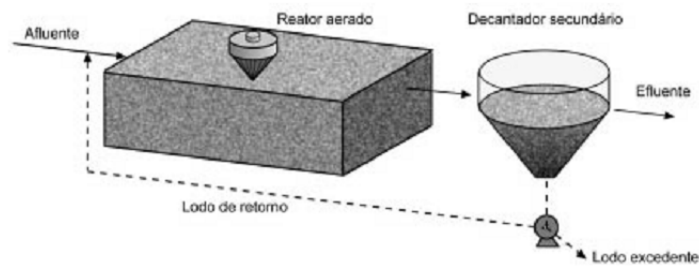


Figura 1 – Esquema das unidades da etapa biológica do sistema de tratamento por lodos ativados

Fonte: Sperling (1997)

Somente a partir de 1960 surgiram algumas abordagens mais racionais para o projeto de sistemas de tratamento com lodos ativados Ramalho (1983).

Porém problemas operacionais foram encontrados, acompanhados pelos novos processos de remoção de nutrientes mais complexos, aumentando assim a necessidade de se utilizar modelos matemáticos para explicar e aperfeiçoar os sistemas de tratamento.

Este fato levou à criação de modelos matemáticos que abranjam os mecanismos biológicos fundamentais, para tornar possível a descrição racional do processo.

Os modelos permitem a utilização de *softwares* computacionais para simular os possíveis impactos que as condições operacionais irão exercer sobre o desempenho do sistema, prevenindo alguns problemas de operação que possam vir ocorrer e a controlar os efeitos indesejáveis causados por perturbações no sistema.

Dessa forma a modelagem se mostra útil, pois permite a construção e a operação de plantas de tratamento com menores custos e mais eficientes Levy (2007).

Diversos modelos destinados à simulação de tratamentos de efluentes sendo desenvolvidos. Em 1987 a *International Water Association* (IWA), desenvolveu o primeiro modelo matemático destinado ao tratamento de efluentes com lodos ativados e foi denominado *Activated Sludge Model No. 1* (ASM1) HENZE M.; GRADY (1987).

Porém esse modelo não descrevia a remoção química e biológica do fósforo com isso foi desenvolvido o ASM2, com este modelo foi deixado claro que nem todos os fenômenos podem ser observados e posteriormente o modelo evoluiu para ASM2d, que apresenta mais parâmetros que seu antecessor HENZE M. (2000).

Com a aplicação do modelo ASM1 ficou evidenciado, alguns erros e defeitos do modelo, para lidar com essas limitações foi desenvolvido o modelo ASM3, este modelo possui independência de fonte de carbono e temperatura e posteriormente foi estendido para conter a remoção biológica por organismos acumuladores de fósforo (OAF) HENZE M. (2000).

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Devido ao tamanho e a complexidade de algumas plantas de tratamentos, a modelagem se mostra bastante viável e útil, pois, se trata uma técnica não intrusiva, onde é possível se obter parâmetros e estimativas que contribuem para o aperfeiçoamento de pesquisas, para projetos de estação de tratamento, para otimização e treinamento operacional;

Através da simulação e implementação dos modelos, é possível combinar diversos parâmetros de operação e projeto, o que favorece como melhor alternativa a ser utilizada em termos de custos e resultados GABALDÓN C.; FERRER (1998).

De acordo com Gernaey K. (2004), os modelos da família ASM têm sido aplicados em diversos *softwares* comerciais para modelagem e simulação, do comportamento dinâmico de processos biológicos.

Os simuladores comerciais, possuem algumas limitações, tais como: complexidade na construção e análise dos modelos; alto custo para renovação das licenças anuais; não possibilitam a visualização, modificação ou ampliação dos modelos simulados.

Neste presente trabalho foi selecionado o simulador EMSO (Environment for Modeling, Simulation and Optimization), este é um *software* de alto desempenho, capaz de simular equipamentos ou processos que tenham sido modelados através de modelos matemáticos Soares (2003).

Por se tratar de um *software* de código aberto foi possível melhorar uma biblioteca de dados, para serem utilizados em questões de ensino, pesquisa e posteriormente como alternativa para treinamento, diminuindo os custos de manutenção de pessoal.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo aprofundado acerca do modelo ASM1. Este estudo permitirá identificar algumas características e os principais parâmetros do modelo e seus respectivos efeitos sobre o processo de tratamento de efluentes, possibilitando assim melhorar a biblioteca existente no simulador EMSO. Para que este objetivo maior seja alcançado, é necessário cumprir as seguintes tarefas:

- Contribuir com uma revisão bibliográfica sobre: Sistemas de tratamento de efluentes por lodos ativados; modelos matemáticos utilizados para tratamento de efluentes por lodos ativados; Simuladores disponíveis no mercado e sobre o simulador EMSO;
- Identificar os principais parâmetros e seus respectivos efeitos sobre o processo de tratamento de efluentes, possibilitando que sejam realizadas simulações em varias configurações industriais que utilizem o sistema por lodos ativados;

- Melhorar uma biblioteca pública de código aberto já existente, contendo, tipos de equipamentos, modelos mais adequados, parâmetros e seus fatores, para que possa ser utilizada para, ensino, pesquisa e alternativa de treinamento pessoal;
- Implementar o modelo matemático ASM1 no simulador EMSO, para simular o comportamento de plantas de tratamento de efluentes por lodos ativados;
- Pretende-se criar no simulador: Uma interface amigável ao usuário; que possa descrever o equipamento; computacionalmente eficiente; que convirja os resultados e de fácil compreensão, utilização e aprendizagem; Permitindo que o equipamento possa ser configurado somente com os parâmetros necessários.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

No Capítulo 2 são apresentados uma descrição geral dos diferentes tipos de sistemas de tratamentos de efluentes. Os mais utilizados e a variação do sistemas de tratamento com Lodo ativado. Legislação vigente sobre o assunto e os principais simuladores disponíveis no mercado atualmente.

No Capítulo 3 trata da modelagem matemática dos sistemas de tratamento de efluentes por lodos ativados, onde a ênfase é dada ao modelo ASM1.

No Capítulo 4 é apresentado o simulador de processos EMSO, onde é tratada a questão das alterações realizadas no modelo ASM1 na linguagem de modelagem do simulador. Esse modelo é a base da biblioteca aberta de modelos para sistemas de tratamento por lodos ativados e que estão disponíveis junto com o simulador.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões, juntamente com as sugestões para o aperfeiçoamento e extensão dos modelos em trabalhos futuros.

2 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES POR LODOS ATIVADOS

Os processos industriais ou esgotos domésticos, produzem geralmente uma grande quantidade de efluentes líquidos, que possuem potencial para degradar o meio ambiente e contaminar rios e lagos, se não forem submetidos a tratamento de maneira correta.

Com as novas regras da legislação, qualquer unidade produtora de água residuárias precisa ter instalado um sistema de tratamento, com a finalidade de diminuir a degradação causada por esse efluente.

Existem inúmeros sistemas de tratamento, e para se identificar o mais adequado para determinada indústria, é necessário ter conhecimento de algumas características do efluente a ser tratado, da disponibilidade de espaço, da quantidade de energia necessária para suprir a demanda do sistema e do custo financeiro para a implantação (GERNAEY K., 2004).

As formas de tratamento podem ser: físicos, químicos ou biológicos. Os tratamentos biológicos, por apresentarem menor custo, são os mais empregados nos sistemas de tratamentos das indústrias de alimentos e esgotos domésticos (FARRUGIA, 2012).

O tratamento biológico é dividido em duas modalidades: os tratamentos aeróbios, onde o processo ocorre na presença de oxigênio, e os tratamentos anaeróbios, onde há ausência de oxigênio no processo (FARRUGIA, 2012).

Atualmente, com o desenvolvimento de novas tecnologias, muitos modelos de tratamentos são reinventados, por meio de combinações de vários métodos, extraindo de cada um suas vantagens e com isso melhorando a eficiência dos tratamentos biológicos existentes.

2.1 SISTEMAS DE TRATAMENTOS ANAERÓBIOS

Os sistemas de tratamento anaeróbio são subdivididos em: lagoas anaeróbias, tanques sépticos, filtros anaeróbios e os reatores capazes de receber maiores quantidades de carga orgânica por unidade volumétrica, como os reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) ou RAFAs (Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente).

Os tratamentos anaeróbios são indicados para efluentes com alta concentração de substâncias orgânicas (AGUIAR, 2011).

2.2 SISTEMAS DE TRATAMENTO AERÓBIOS

Os sistemas aeróbios de tratamento de efluentes mais utilizados são os sistemas de lagoas facultativas, de estabilização ou aeradas, filtros biológicos e os sistemas de lodos ativados (SPERLING, 1997).

O tratamento aeróbio é um método que permite obter rapidamente, e em melhores condições, a estabilização da matéria orgânica.

Este método é utilizado para a quebra de grande quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nos resíduos. Por meio da respiração aeróbia, os microrganismos começam a oxidar a matéria orgânica, com ação de bactérias denominadas “formadoras de flocos”. As bactérias filamentosas em equilíbrio, são importantes para assegurar a formação de flocos densos e fortes (ALBERTE, 2003).

A respiração aeróbica ocorre na presença de oxigênio no reator, podendo ser adicionado por bombas de aeração na forma de oxigênio dissolvido (KOSER, 2012).

Este trabalho tem como foco os sistemas de tratamento aeróbio, especificamente nos lodos ativados.

2.2.1 LODOS ATIVADOS

O sistema de lodos ativados são extremamente utilizados em tratamento de esgotos doméstico e industriais, por se tratar de um processo de baixo custo, facilidade de operação e versatilidade e menor área ocupada pelo sistema. Entretanto, requer alto grau de controle operacional e manutenção para obter um resultado com máxima eficiência (KOSER, 2012).

Os lodos ativados podem ser operados de forma convencional, mistura completa, com oxigênio puro, com aeração escalonada, em reator sequencial, entre outros.

Todos os tratamentos por lodos ativados exibem digestão aeróbia e muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de aprimorar cada vez mais esse tipo de tratamento, reduzindo custos, principalmente com aeração, diminuição de área gasta na construção e outros fatores (ALBERTE, 2003).

O sistema por lodos ativados é formado basicamente por:

- uma corrente de entrada;
- por um reator, onde ocorrem as reações bioquímicas, e neste ponto o substrato é utilizado para que a biomassa se desenvolva, e está presente no esgoto bruto;
- por um decantador secundário, onde ocorre a sedimentação da biomassa e com isso a clarificação do efluente final. Assim, uma parte do sedimentado volta para o sistema, por meio de bombeamento, e outra parte é descartado, isso deve ocorrer em função da produção contínua de lodo no tanque de aeração (crescimento microbiológico) (SPERLING, 1997).

Acontece que a concentração de lodo no decantador secundário não pode exceder um dado valor máximo, sob pena de perda da sua condição de operação, o que leva à geração

de um efluente final cheio de sólidos e à perda da sua especificação (KOSER, 2012).

No adensamento ocorre a formação de um lodo com maior concentração. Ao chegar no digestor, o lodo concentrado passa a ser estabilizado por meio da autofagia dos microrganismos (canibalismo) (FERREIRA, 2006).

O lodo descartado, então, deve ser encaminhado a uma unidade de adensamento e, posteriormente, enviado a uma unidade de digestão, para sua estabilização (FERREIRA, 2006).

Após sua estabilização, o lodo digerido é encaminhado para disposição final, por meio de uma das seguintes técnicas:

- ▣ Disposição em aterros industriais;
- ▣ Incineração a altas temperaturas;
- ▣ Disposição em fazendas de lodo;
- ▣ Compostagem com solo, para geração de adubo.

A Figura 2 ilustra um esquema das unidades da etapa biológica do sistema de lodo ativado de fluxo contínuo.

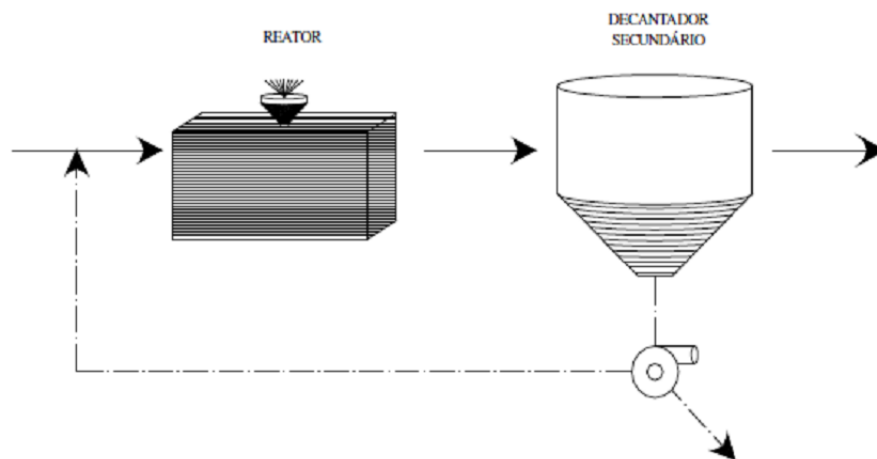


Figura 2 – Esquema das unidades da etapa biológica do sistema de lodo ativado de fluxo contínuo

Fonte: Sperling (1997)

2.2.2 VARIANTES DOS PROCESSOS DE LODOS ATIVADOS

De acordo com Sperling (1997), os processos de lodo ativado apresentam diversas variantes, classificadas de acordo com a idade do lodo, com o tipo de fluxo (contínuo e intermitente) e quanto à etapa biológica do sistema de lodos ativados.

2.2.2.1 SISTEMA DE LODO ATIVADO CONVENCIONAL (FLUXO CONTÍNUO)

O Sistema de lodo ativado convencional é constituído por um biodigestor, um decantador primário, e um decantador secundário. No decantador primário, a matéria orgânica em suspensão é retirada antes de ser disposta no tanque de aeração, gerando uma economia no consumo de energia (SPERLING, 1997).

A concentração de biomassa no reator é bastante elevada, devido à recirculação dos sólidos (biomassa) sedimentados no fundo do decantador secundário. O tempo de retenção hidráulico varia entre 6 a 8 horas, e a idade do lodo de 4 a 10 dias. Com essa idade, a biomassa retirada possui grande quantidade de matéria orgânica em suas células, então o lodo deve ser submetido a uma etapa de estabilização (SPERLING, 1997).

2.2.2.2 SISTEMA DE LODO ATIVADO COM AERAÇÃO PROLONGADA (FLUXO CONTÍNUO)

O Sistema de lodo ativado com aeração prolongada é similar ao sistema convencional, com algumas diferenças. O tempo de retenção hidráulica varia entre 18 a 30 dias, os reatores são maiores, porém, a carga de DBO da corrente de entrada é a mesma. Logo, existirá uma concentração menor de matéria orgânica por unidade de volume e menor disponibilidade de alimento. Devido a isso as bactérias passam a consumir a matéria orgânica existente no próprio material celular, realizando dessa forma a estabilização do lodo (SPERLING, 1997).

Como a estabilização do lodo acontece de maneira aeróbica no interior do reator, há um maior consumo de energia. Porém, este sistema apresenta maior eficiência de remoção de DBO dentre os sistemas de lodos ativados (SPERLING, 1997).

2.2.2.3 SISTEMA DE LODO ATIVADO DE FLUXO INTERMITENTE (BATELADA)

O Sistema de lodo ativado de fluxo intermitente é mais comum, devido à sua maior simplicidade operacional e parte do princípio da incorporação de todas as unidades, processos e operações normalmente associados ao tratamento tradicional de lodos ativados, em um único tanque. Logo, os processos e operações, deixam de ser unidades separadas e passam a ser sequenciais no tempo, sem recirculação de lodo (SPERLING, 1997).

Um sistema de lodos ativados com fluxo intermitente possui ciclos de operação definidas, tais como: enchimento, reação, sedimentação, esvaziamento e repouso (SPERLING,

1997).

A duração usual de cada ciclo pode ser alterada em função da carga inicial e caracterização de cada corrente de entrada, dos objetivos operacionais do tratamento e das características da biomassa no sistema.

Esse processo pode ser utilizado na modalidade convencional e de aeração prolongada, onde o tanque passa a incorporar também a unidade de digestão (aeróbia) do lodo (SPERLING, 1997).

2.2.3 REATOR COM DECANTAÇÃO E COM RECIRCULAÇÃO

A recirculação da biomassa é o princípio básico do sistema de lodos ativados. Ela representa um papel importante para aumentar o tempo médio que a biomassa permanece no sistema.

A Figura 3 representa um sistema típico por lodos ativados de fluxo contínuo.

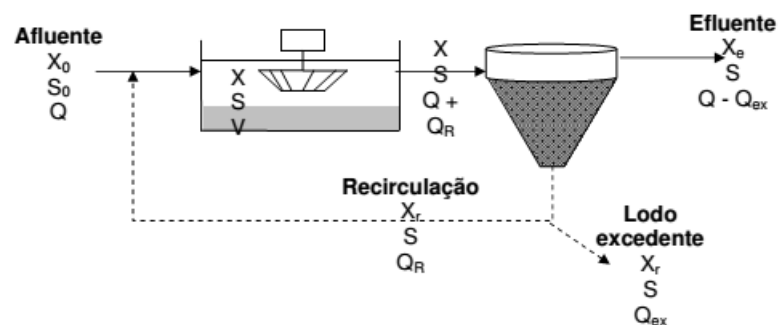


Figura 3 – Reator com circulação de sólidos (Sistema de lodos ativados).

Fonte: ??)

Onde:

- Q vazão de alimentação (m^3/d)
- Qr vazão de recirculação (m^3/d)
- Qex vazão de lodo excedente (m^3/d)
- So concentração de DBO afluente (mg/L)
- S concentração de DBO efluente (mg/L)
- X concentração de sólidos em suspensão no reator (mg/L)
- Xo concentração de sólidos em suspensão no afluente (mg/L)
- Xe concentração de sólidos em suspensão no efluente (mg/L)
- Xr concentração de sólidos em suspensão do lodo excedente (mg/L)
- V volume do reator (m^3)

O lodo recirculado apresenta uma concentração maior de sólidos em suspensão no reator. A recirculação pode ser feita por meio de bombeamento do lodo sedimentado do decantador secundário ou através de outros procedimentos operacionais de retenção de sólidos no reator (SPERLING, 1997).

O sistema é basicamente: recirculação da biomassa ativa através do retorno de lodo do decantador secundário; manutenção do suprimento de ar ao tanque aerado; condições adequadas de mistura, e ausência de condições tóxica; descarte de biomassa em excesso ou retorno da mesma ao sistema (SPERLING, 1997).

Para obter um detalhamento mais completo e melhor compreensão sobre os sistemas de tratamento de efluentes por lodos ativados, o leitor poderá consultar a literatura especializada, como por exemplo o livro de Sperling (1997).

2.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL APLICADA À INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

O lançamento de quantidade elevadas de matéria orgânica, fósforo, nitrogênio e substâncias tóxicas ao meio ambiente, acarretam alguns efeitos como: alteração do ciclo de vida de muitos organismos, a proliferação de bactérias consumidoras de oxigênio, resultando na morte de peixes e outros organismos e eutrofização de lagoas, lagos e rios (SPERLING, 1997).

No ano de 1986 foi instituída a Resolução nº 20/1986 do Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente), que reformulou a classificação para águas doces, salobras e salinas no Brasil. Esta classificação tinha como base as características da água e o seu uso. A partir desta resolução, foram estabelecidas diversas normas e diretrizes nos anos seguintes (KOSER, 2012).

Em 2005 foi estabelecida a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências (KOSER, 2012).

Esta última foi alterada e complementada pela Resolução 430, de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA (FARRUGIA, 2012).

Em conjunto, estas duas Resoluções estabelecem os limites, condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos receptores (LEVY, 2007).

2.4 SIMULADORES DISPONÍVEIS NO MERCADO

A utilização de modelos matemáticos, e a simulação de processos de lodos ativados podem auxiliar na projeção de estações de tratamento de efluentes, para que estas respeitem

os padrões de emissão de poluentes definidos pela legislação. As ferramentas de simulação podem auxiliar na predição do comportamento dos sistemas após os ajustes das condições de operação (FERREIRA, 2006).

De acordo com Gernaey K. (2004), os modelos ASM têm sido aplicados em diversos *softwares* proprietários de modelagem e simulação. Estes são utilizados principalmente, para prever o comportamento dinâmico de processos biológicos e são cada vez mais utilizados para o apoio de operação, otimização e gestão de plantas de tratamento de efluentes.

No trabalho de Pombo (2010), o autor relacionou os principais *softwares* disponíveis no mercado para descrever os modelos de tratamento por lodos ativados e que utilizam os modelos ASM, dos quais se destacam: GPS-X, SIMBA, AQUASIM, ASIM, BioWin, EFOR, STOAR, WEST.

Uma breve descrição é mostrada abaixo:

- ➡ **GPS-X (*Hydromantis*):** O GPS-X é um programa de modelação e simulação do comportamento dinâmico dos processos de tratamento de águas residuais domésticas e industriais. O GPS-X é considerado como o estado-da-arte em termos de tecnologia. O programa foi concebido de acordo com os mais recentes processos de modelação e simulação e utiliza uma série de ferramentas de produtividade que simplificam e flexibilizam a sua aplicação, nomeadamente, no que refere à construção do modelo, simulação e interpretação dos resultados.

Mais informações podem ser obtidas em: <<http://www.hydromantis.com>>.

- ➡ **AQUASIM (*EAWAG – Aquatic Search e Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology*):** Este *software* permite ao usuário a definição e configuração espacial do sistema, através de um conjunto de blocos ou compartimentos, que podem ser interligados. Atualmente, os blocos pré-definidos, presentes no *software*, incluem reatores de mistura completa, reatores de biofilme entre outros. O *software* permite ao usuário definir o modelo de simulação, através da seleção de um conjunto de variáveis de estado e de processos de transformação, sendo possível modelar, de acordo com o tipo de sistema de tratamento utilizado e o perfil de efluente a ser lançado no receptor final.

Mais informações podem ser obtidas em: <<http://www.aquasim.eawag.ch/>>.

- ➡ **ASIM (I):** O software ASIM (*Activated Sludge SIMulation Program*) permite a simulação de diversos sistemas de tratamento biológico de águas residuárias, incluindo processos de lodos ativados integrados com sistemas de até um máximo de 10 reatores dispostos em sequência (aeróbios, anóxicos e anaeróbios), incluindo a recirculação de lodos e escurrências do tratamento da fase líquida, reatores de fluxo contínuo e descontínuo. Uma das características do ASIM é permitir ao usuário definir, armazenar e editar os modelos biocinéticos: os diferentes parâmetros e componentes utilizados para a

caracterização das águas residuárias e os processos de transformação importantes em termos de estequiometria e cinética. O programa inclui os modelos ASM1 (adaptado), ASM2d e ASM3 da IAWQ.

Mais informações podem ser obtidas em: <<http://www.asim.eawag.ch/index.htm>>.

- **BioWin (*EnviroSim Associates LTD*)**: O *software* permite simular o comportamento de plantas de tratamento de efluentes por meio de diversos modelos matemáticos, tais como, os modelos de lodos ativados da IWAQ (ASM1, ASM2D e ASM3) e o modelo de Takács para decantadores secundários. O editor do programa permite, ao usuário especificar os seus próprios modelos. O *software* é integrado por diversos módulos: reatores biológicos de lodos ativados, RDS e bioreatores de membradas (MBR), decantadores primários e secundários, elementos de entrada – afluência, definida com base em DBO5 ou definida pelo usuário, adição de compostos metálicos para a precipitação química do fósforo (de ferro ou alumínio), o metanol para a desnitrificação, tanques de equalização, digestores anaeróbios e aeróbios, armazenamento, espessamento e desidratação de lodos ativados.

Mais informações podem ser obtidas em: <<http://www.envirosim.com>>.

- **EFOR (*Króger A/S and Emolet Data e Technical University of Denmark*)**: O *software* é utilizado no dimensionamento e exploração de plantas de tratamento, permitindo ao utilizador compreender e prever o desempenho das infraestruturas de tratamento através da construção de várias configurações dos órgãos de tratamento, esquemas de operação e diferentes afluências. Os modelos matemáticos implementados no *software*, são baseados nos modelos de lodos ativados da IWAQ, incluem o ASM1, ASM2 e ASM3. O modelo principal, o CNDP, permite simular a remoção da matéria orgânica, nitrificação, desnitrificação e remoção química e biológica de fósforo (baseado nos modelos ASM1 e ASM2d).

Mais informações podem ser obtidas em: <<http://www.mpassociates.gr/software/environment/efor.html>>.

- **STOAT (*Water Research Center e Imperial College*)**: O *software* integra modelos dinâmicos para simular os processos de tratamento associados aos seguintes órgãos: tanques de equalização, decantadores primários, reatores de lodos ativados, incluindo, valas de oxidação, RDS, sistemas para remoção de azoto e fósforo, decantadores secundários, filtros biológicos, leitos percoladores, desinfecção, decantação quimicamente assistida, flotação por ar dissolvido, remoção química de fósforo, digestão anaeróbia de lodos, incineração de lodos, secagem de lodos, desidratação de lodos, controladores do tipo PID, instrumentação, entre outros recursos.

Os modelos matemáticos implementados no *software* são baseados nos modelos de lodos ativados da IWAQ, ASM1, ASM2 e ASM3 e o modelo para decantadores secundários são aqueles descritos por Takács.

Mais informações podem ser obtidas em: <<http://www.wrcplc.co.uk/>>.

► **WEST (*IBM Bélgica and Flemish Governmental Agency for Science and Technology*):**

O *software* pode ser utilizado no dimensionamento e exploração de plantas de tratamentos de efluentes, para otimização dos processos e redução dos custos, avaliar estratégias de controle e no treinamento de operadores. A estrutura do modelo é criada de uma forma gráfica, selecionando as diferentes unidades de uma biblioteca de processo. O WEST possui uma extensa biblioteca de modelos, em uma estrutura aberta, que permite a implementação de novos modelos ou a alteração de qualquer um dos modelos existentes, através do editor MSL – *Model Specification Language*. Permite também a integração com sistemas de supervisão, dados de exploração e gestão de plantas de tratamentos de efluentes, para calibração e validação do modelo, integra rotinas destinadas à análise de sensibilidade e análise de configurações alternativas. Os modelos matemáticos implementados no programa são baseados nos modelos de lodos ativados da IWAQ (ASM1, ASM2, ASM3 e variantes) e o modelo para decantadores secundários são aqueles descritos por Takács.

Mais informações podem ser obtidas em: <<http://www.dhigroup.com>>.

► **SIMBA (*Institut für Automation und Kommunikation*):** O *software* é baseado no sistema de simulação MATLAB/SIMULINK ¹, que fornece ótimas opções para a análise de algoritmos de controle, permitindo analisar, de uma forma sistemática, os conceitos de controle em pouco tempo; analisar situações novas, mesmo sob condições definidas e repetíveis e considera processos comuns e conceitos de automação, a fim de alcançar soluções econômicas. O *software* integra modelos pré-definidos, baseados nos modelos de lodos ativados da IWAQ (ASM1, ASM2, ASM3 e variantes). O programa permite ao usuário criar modelos de simulação, através da construção gráfica de sistemas, com base em blocos pré-definidos que representam os processos associados às unidades de tratamento: afluência de caudais, decantadores primários e secundários, reatores de lodos ativados e no tratamento da biomassa.

Mais informações podem ser obtidas em: <<http://www.adcsba.de/index.php?id=166>>.

Com a utilização destas ferramentas de simulação, o usuário pode compreender melhor as interações complexas existentes entre as diversas unidades do processo de forma não intrusiva, interativa e dinâmica. Os *softwares* de simulação permitem o auxílio na projeção, operação, otimização e controle das plantas de tratamento de efluentes.

¹ Matlab e Simulink são marcas registradas da empresa *The MathWorks, Inc.*

3 MODELO ACTIVATED SLUDGE MODEL Nº. 1 (ASM1)

3.1 MODELOS MATEMÁTICOS

Os modelos matemáticos destinados à simulação de sistemas de tratamento de efluentes, juntamente com a simulação, se tornam ferramentas essenciais, para o planejamento, otimização e projeto. São ferramentas eficazes para a manutenção e operação adequada dos processos que ocorrem nas plantas de tratamento de efluentes, que apresentam diferentes níveis e complexidade (KHU S.-T., 2006).

De acordo com Pombo (2010), um modelo matemático é a representação simplificada do que acontece na realidade em uma planta de tratamento. Possibilitando desta forma, a análise do comportamento e de possíveis falhas que possam ocorrer no sistema. Facilitando assim, a compreensão dos processos envolvidos. De uma forma geral, é um conjunto de equações e procedimentos matemáticos, formados por diversos parâmetros e variáveis, que se modificam com o tempo.

Em 1983, a *International Water Association* (IWA), formou um grupo de trabalho com o objetivo de promover a aplicação e adequação de modelos práticos para o desenvolvimento de projeto e operação de sistemas biológicos de tratamento de efluentes em processos por lodos ativados. Em 1987 foi publicado o resultado desse trabalho, culminando no desenvolvimento de uma família de modelos por lodos ativados. O primeiro modelo foi denominado *Activated Sludge Model* Nº. 1 (ASM1).

O ASM1 é capaz de fornecer uma descrição adequada da produção de lodo em estações de tratamento de esgotos. No ASM1, são apresentados oito processos biológicos e treze componentes, que descrevem a remoção de matéria carbonácea, nitrificação e desnitrificação.

As substâncias orgânicas do efluente foram divididas em frações, de acordo com a biodegradabilidade e solubilidade em água. Desta maneira, pode-se definir dois tipos de substratos: Os substratos lentamente biodegradáveis que são descritos como sólidos, mas que representam também substâncias solúveis mais complexas que sofrem hidrólise extracelular, sendo convertidas no segundo tipo de substrato, os rapidamente biodegradáveis (HENZE M.; GRADY, 1987).

A inclusão da modelagem com remoção química e biológica do fósforo se deu a partir do modelo AMS2. Nesse modelo é deixado claro que nem todos os fenômenos podem ser observados.

O modelo ASM2, apresenta vinte componentes e dezenove processos. Se comparados os modelos, o AMS2 possui uma estrutura celular interna, sendo possível descrever a função

dos microrganismos acumuladores de fósforo (OAF).

Também foram incluídos dois processos de precipitação química do nutriente, com a utilização de hidróxido de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Com a capacidade desnitrificante de OAF, o modelo ASM2 evoluiu para o ASM2d, onde o modelo passou a contar com vinte e um processos, dois a mais do que o modelo ASM2 (HENZE M., 2000) .

Com a aplicação do modelo ASM1 foram evidenciados alguns erros e defeitos do modelo, para lidar com essas limitações foi desenvolvido o modelo ASM3, esse modelo possui independência de fonte de carbono e temperatura e posteriormente foi estendido para conter a remoção biológica de fosforo por organismos acumuladores de fósforo (OAF) (HENZE M., 2000) .

De acordo com Gernaey K. (2004) , Os modelos ASM têm sido aplicados em diversos softwares comerciais de modelagem e simulação do comportamento dinâmico de processos biológicos.

3.2 DESCRIÇÃO DO MODELO ACTIVATED SLUDGE MODEL Nº. 1 (ASM1)

Neste trabalho foi abordado o modelo ASM1, pois, representa as reações biológicas que acontecem no interior do reator biológico e por ser amplamente utilizado e aceito na academia e na indústria.

O modelo ASM1 (*Activated Sludge Model Nº 1*) foi desenvolvido utilizando uma notação matricial, aplicado a sistemas de tratamento, sendo capaz de fornecer uma descrição adequada da produção de lodo em estações de tratamento de esgotos.

A matriz adotada no ASM1 inclui oito processos biológicos e treze componentes de caracterização das águas residuárias, cinco coeficientes estequiométricos, quatorze parâmetros cinéticos que descrevem a remoção de matéria carbonácea, nitrificação e desnitrificação (HENZE M.; GRADY, 1987).

A notação matricial do modelo ASM1 pode ser consultada no Anexo 1.

3.2.1 COMPONENTES DE CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Estudos realizados por Levy (2007) e Pombo (2010) demonstram que os treze componentes de caracterização, são divididos em oito componentes solúveis e cinco particulados.

A Tabela 1 apresenta as variáveis e os processos envolvidos em cada componente incluídos no modelo ASM1.

Como pode ser observado, os componentes são divididos em substâncias orgânicas e nitrogenadas.

A seguir é apresentada uma breve descrição destes componentes.

Tabela 1 – Componentes de caracterização das águas residuárias.

Símbolo	Nome	Unidade	Formação	Remoção
S_I	Material orgânico solúvel inerte	$M(DQO)/L^3$	-	-
X_I	Componentes de caracterização das águas residuárias Material orgânico particulado inerte	$M(DQO)/L^3$	-	-
S_S	Substrato prontamente biodegradável	$M(DQO)/L^3$	Hidrolise de X_S	Crescimento de $X_{B,H}$
X_S	Substrato lentamente biodegradável	$M(DQO)/L^3$	Decaimento de $X_{B,H}$ ou $X_{B,A}$	Hidrolise de S_S
$X_{B,H}$	Biomassa heterotrófica	$M(DQO)/L^3$	Crescimento	Decaimento
$X_{B,A}$	Biomassa autotrófica	$M(DQO)/L^3$	Crescimento	Decaimento
X_P	Produtos particulados originados pelo decaimento da biomassa	$M(DQO)/L^3$	Decaimento de $X_{B,H}$ ou $X_{B,A}$	-
S_O	Concentração de oxigênio dissolvido no reator	$M(-DQO)/L^3$	-	Crescimento aeróbio
S_{NO}	Nitrogênio na forma de nitrato	$M(N)/L^3$	Nitrificação	Desnitrificação
S_{NH}	Nitrogênio na forma NH^{4+} e NH^3	$M(N)/L^3$ Amonificação de S_{ND}	Crescimento de $X_{B,H}$ ou $X_{B,A}$	
S_{ND}	Nitrogênio orgânico solúvel biodegradável	$M(N)/L^3$ Hidrolise de X_{ND}	Amonificação de S_{NH}	
X_{ND}	Nitrogênio orgânico particulado biodegradável	$M(N)/L^3$	Decaimento	Hidrolise de S_{ND}
S_{ALK}	Alcalinidade	Molar		

Fonte: Adaptação de Pombo (2010), Levy (2007).

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS

As substâncias orgânicas do efluente foram divididas em frações, de acordo com a biodegradabilidade e solubilidade em água. As substâncias não biodegradáveis, não sofrem alterações no sistema, e estão presentes na forma solúvel ou particulada. As substâncias solúveis inertes S_I , não participam de nenhuma reação no sistema. As substâncias inertes particuladas, ficam englobadas na biomassa e são removidas no descarte (HENZE M.; GRADY, 1987).

O material orgânico foi definido em dois tipos de substratos: Os substratos lentamente biodegradáveis X_S , são moléculas relativamente complexas, que são consideradas como sólidos, mas representam também substâncias solúveis, que sofrem hidrólise extracelular, sendo convertidas em substrato prontamente biodegradável S_S . Estas são consideradas moléculas simples, sendo consumidas por bactérias heterotróficas e utilizadas para a manutenção e crescimento da biomassa (HENZE M.; GRADY, 1987).

De acordo com Levy (2007), o crescimento da biomassa heterotrófica $X_{B,H}$ e autotrófica X_{BA} , pode se resultar a partir do consumo de substrato prontamente biodegradável, em configurações aeróbicas e anóxicas. Este crescimento pode ser interrompido em condições anaeróbicas.

O decaimento da biomassa resulta na conversão da mesma em substrato lentamente biodegradável e produtos particulados X_P , este é inerte à ação bacteriana (SPERLING, 1997).

O decaimento da biomassa que ocorre no ASM1, é independente das condições ambientais.

A geração de novas células ocorre através da conversão do substrato lentamente biodegradável, e é influenciada pelo aceptor de elétrons (FERREIRA, 2006).

3.2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS SUBSTÂNCIAS NITROGENADAS

As substâncias nitrogenadas foram divididas de acordo com a solubilidade, biodegradabilidade e taxa de biodegradação. O nitrogênio total é subdividido em dois componentes distintos: nitrogênio orgânico solúvel S_{NH} , nitrogênio orgânico particulado S_{ND} e amônia NH^3 e NH^{4+} (LEVY, 2007).

O nitrogênio orgânico solúvel é formado a partir da hidrólise do nitrogênio orgânico particulado, conjuntamente com a hidrólise dos substratos lentamente biodegradável X_S (LEVY, 2007).

As bactérias heterotróficas agem sobre o nitrogênio solúvel, convertendo-os em amônia, que é utilizada para a síntese da biomassa heterotrófica e como fonte de energia das bactérias autotróficas nitrificantes (GERNAEY K., 2004).

A nitrificação, ou seja, a conversão autotrófica da amônia em nitrato ocorre em uma única variável a fim de simplificar o modelo (LEVY, 2007).

De acordo com David e VANDE A. (2009), a concentração de oxigênio dissolvido S_o e a alcalinidade S_{ALK} , não interagem com o restante dos componentes, porém, desempenham um papel fundamental no processo.

3.2.4 COEFICIENTES ESTEQUIOMÉTRICOS

A Tabela 2 apresenta os coeficientes estequiométricos do modelo ASM1.

Tabela 2 – Coeficientes estequiométricos do modelo ASM1.

Símbolo	Nome	Unidade
Y_A	Rendimento heterotrófico (massa celular formada DQO/DQO oxidada)	(g DQO/g N)
Y_H	Rendimento heterotrófico (massa celular formada DQO/DQO oxidada)	(g DQO/g N)
f_p	Fração de biomassa que resulta em produtos particulados	Adimensional
i_{XB}	Massa N/massa DQO na biomassa	(g N/g DQO)
i_{XP}	Massa N/massa em DQO de produto de biomassa	(g N/g DQO)

Fonte: Adaptação de HENZE M. (2000), Levy (2007).

3.2.5 PARÂMETROS CINÉTICOS

A Tabela 3 apresenta os parâmetros cinéticos do modelo ASM1.

De acordo com (LEVY, 2007), esses parâmetros cinéticos dependem dos substratos e microrganismos formadores do lodo, de maneira que os parâmetros afetam diretamente o desempenho de operação do processo.

3.2.6 PROCESSOS OCORRENTES NO MODELO ASM1

Os processos considerados no modelo ASM1 são baseados no crescimento e decaimento das biomassas heterotróficas e autotróficas, hidrólise dos substratos particulados orgânicos e na amonificação de nitrogênio orgânico solúvel.

A seguir uma descrição das taxas responsáveis por esses processos (HENZE M., 2000).

3.2.6.1 CRESCIMENTO AERÓBIO DE BIOMASSA HETEROTRÓFICA

O crescimento de biomassa ocorre com o consumo de substratos solúveis e resulta na produção de biomassa heterotrófica, associada ao consumo de oxigênio. O nitrogênio na forma de amônia é retirado da solução e incorporado na massa celular.

Tabela 3 – Parâmetros cinéticos do modelo ASM1.

Símbolo	Nome	Unidade
μ_H	máxima taxa de crescimento específico da biomassa heterotrófica	(dia^{-1})
b_H	taxa de decaimento da biomassa heterotrófica	(dia^{-1})
K_S	coeficiente de saturação para organismos heterotróficos	(massa DQO/volume)
$K_{O,H}$	coeficiente de saturação de oxigênio para organismos heterotróficos	(massa O_2 /volume)
K_{NO}	coeficiente de saturação de nitrato para heterotróficos	(massa N/volume)
μ_A	máxima taxa de crescimento específico da biomassa autotrófica	(dia^{-1})
b_A	taxa de decaimento da biomassa autotrófica	(dia^{-1})
$K_{O,A}$	coeficiente de saturação de oxigênio para organismos autotróficos	(massa O_2 /volume)
K_{NH}	coeficiente de saturação de amônia para organismos autotróficos	(massa N/volume)
K_a	taxa específica de amonificação	(volume/massa dia)
K_h	máxima taxa específica de hidrólise	(massa DQO lentamente biodeg./massa DQO celular. dia)
K_X	coeficiente de saturação para substrato lentamente biodegradável	(DQO lentam. biodeg./DQO celular)
η_g	fator de correção para μ_H sob condições anóxicas	Adimensional
η_h	fator de correção para hidrólise sob condições anóxicas	Adimensional

Fonte: Adaptação de Levy (2007).

Este processo contribui principalmente, de maneira geral, para a produção das novas células bacterianas e a degradação do substrato, representado pela Equação 3.1.

$$r_1 = \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H} \quad (3.1)$$

3.2.6.2 CRESCIMENTO ANÓXICO DA BIOMASSA HETEROTRÓFICA

Certos microrganismos heterotróficos são capazes de utilizar o nitrato como aceptores de elétrons com S_S como substrato na ausência do oxigênio.

Neste processo ocorre a produção da biomassa heterotrófica e do nitrogênio gasoso por redução do nitrato. O nitrogênio, na forma de nitrato, atua comoceptor final de elétrons. Sua remoção é proporcional à quantidade de substrato prontamente biodegradável removido, menos a quantidade de células formadas.

O nitrogênio amoniacal é utilizado na síntese celular em fase anóxica, representado pela Equação 3.2.

$$r_2 = \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H} \quad (3.2)$$

3.2.6.3 CRESCIMENTO AERÓBIO DA BIOMASSA AUTOTRÓFICA

A oxidação da amônia em nitrato (nitrificação) resulta do metabolismo de microrganismos autotróficos e do consumo do oxigênio dissolvido. Para o crescimento dos heterotróficos, a amônia é utilizada para fornecer o nitrogênio necessário a ser incorporado nas novas células. O processo apresenta um efeito nítido na alcalinidade, que provém da conversão da amônia em biomassa e para a oxidação da amônia em nitrato, e a demanda total de oxigênio, representado pela Equação 3.3.

$$r_3 = \mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A} \quad (3.3)$$

3.2.6.4 DECAIMENTO DAS BIOMASSAS HETEROTRÓFICA E AUTOTRÓFICA

A abordagem utilizada para modelar esse processo foi baseada no conceito de morte-regeneração. O processo é modelado de acordo com as hipóteses do conceito de morte-regeneração.

O decaimento dos microrganismos heterotróficos e autotróficos produzem-se continuamente, independentemente das condições de do ambiente. O processo de decaimento converte a biomassa em uma combinação de produtos particulados e de substrato lentamente biodegradável. O nitrogênio orgânico presente na massa celular é restituído ao ambiente,

após o decaimento da biomassa, e é acrescentado à quantidade já presente de nitrogênio orgânico particulado biodegradável X_{ND} .

No processo, não há consumo da DQO e os aceptores de elétrons não são utilizados, representados pela Equação 3.4 e Equação 3.5.

$$r_4 = b_H \cdot X_{B,H} \quad (3.4)$$

$$r_5 = b_A \cdot X_{B,A} \quad (3.5)$$

3.2.6.5 AMONIFICAÇÃO DO NITROGÊNIO ORGÂNICO SOLÚVEL

A equação representativa da taxa é de primeira ordem e de natureza empírica, mas foi considerada adequada para modelar a conversão, quando associada com a taxa do processo de hidrólise de nitrogênio orgânico particulado englobado no floco, representada pela Equação 3.6.

$$r_6 = K_A S_{ND} X_{B,H} \quad (3.6)$$

3.2.6.6 HIDRÓLISE DO MATERIAL ORGÂNICO LENTAMENTE BIODEGRADÁVEL

O substrato lentamente biodegradável X_S , presente no lodo ativado é hidrolisado, produzindo o substrato prontamente biodegradável S_S , favorecendo o crescimento dos microrganismos presentes no sistema.

A modelagem do processo de hidrólise é baseada em cinéticas de superfície; este processo é realizado tanto em condições de aerobiose como em anóxica.

Um coeficiente η_K é introduzido para equilibrar a baixa taxa de hidrólise sob condições de anóxicas.

O modelo cinético é de ordem 1 em relação a biomassa heterotrófica $X_{B,H}$ ativa presente no meio.

A saturação ocorre quando a quantidade de substrato englobado no floco é muito maior do que a quantidade de biomassa. Este processo é representado pela Equação 3.7.

$$r_7 = K_h \cdot \frac{\frac{X_S}{X_{B,H}}}{K_x + \left(\frac{X_S}{X_{B,H}}\right)} \cdot \left[\left(\frac{S_O}{S_O + K_{O,H}} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H} \quad (3.7)$$

3.2.6.7 HIDRÓLISE DO NITROGÊNIO ORGÂNICO

A taxa de solubilidade do nitrogênio orgânico particular é proporcional à taxa de solubilidade da matéria orgânica particulada, representada pela Equação 3.8.

$$r_8 = K_h \cdot \frac{\frac{X_s}{X_{B,H}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{B,H}}\right)} \cdot \left[\left(\frac{S_O}{S_O + K_{O,H}} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H} \cdot \left(\frac{X_{ND}}{X_S} \right) \quad (3.8)$$

No Anexo 1 é apresentado a matriz do modelo ASM1, a qual facilita a leitura e a aplicação, e que deve ser lida da seguinte forma: cada coluna representa, um dos componentes do modelo, enquanto cada linha representa, um determinado processo do modelo. Para obter a taxa reacional de um dos componentes do modelo, deve-se seguir a coluna do componente escolhido, multiplicando-se os coeficientes estequiométricos representados pela taxa correspondente, esta se encontra na mesma linha do coeficiente estequiométrico (LEVY, 2007).

3.2.7 LIMITAÇÕES DO MODELO ASM1

É necessário observar algumas limitações associadas ao modelo ASM1 (HENZE M., 2000; LEVY, 2007):

- O modelo ASM1 não inclui expressões cinéticas que lidam com as limitações dos organismos heterotróficos em relação ao nitrogênio e à alcalinidade;
- O modelo ASM1 inclui nitrogênio solúvel biodegradável e nitrogênio orgânico particulado como componentes. Essas variáveis não podem ser facilmente medidas e tornam o uso do ASM1 desnecessariamente complicado;
- As cinéticas de amonificação no ASM1 não são facilmente quantificadas, além do processo ser rápido e afetar muito as predições do modelo;
- O modelo ASM1 diferencia material particulado orgânico inerte, dependendo de sua origem, afluentes ou decaimento de biomassa. Contudo, na realidade é impossível diferenciar essas frações;
- Na estrutura do modelo ASM1, o processo de hidrólise apresenta um efeito dominante sobre as predições de consumo de oxigênio e desnitrificação por organismos heterotróficos;
- A lise celular combinada com a hidrólise e o crescimento é usada para descrever os efeitos combinados da respiração endógena. Isto leva a dificuldades para o cálculo de parâmetros cinéticos;

- Com elevada concentração de substratos orgânicos prontamente biodegradáveis, a estocagem de poli-hidroxi-alcanoatos, lipídios e glicogênio pode ser observada sob condições aeróbias ou anóxicas nas plantas de lodo ativado. Esse processo não está incluído no modelo ASM1;
- O modelo ASM1 não inclui a possibilidade de diferenciar as taxas de decaimento dos organismos nitrificantes sob condições aeróbias e anóxicas. Em altos tempos de residência e altas frações anóxicas do volume do reator, isto leva a problemas com a predição de máximas taxas de nitrificação;
- O modelo ASM1 não prediz diretamente a concentração de sólidos suspensos na mistura do reator.

4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO ASM1 NO SIMULADOR EMSO

4.1 BIBLIOTECA DE CÓDIGO DO MODELO ASM1

O modelo matemático ASM1 e a biblioteca de código aberto, utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, foram desenvolvidos a partir do código original da *The Modelica Association*.

Modelica é uma linguagem gratuita e de código aberto desenvolvida pela *The Modelica Association*, a qual também desenvolve a *Modelica Standard Library* que contém mais de 780 modelos de componentes genéricos e 550 funções multipropósito (disponível em: <<https://www.modelica.org/>>).

Apesar de Modelica ser similar a linguagens de programação orientadas à objeto, como C++ e Java, ela difere destas em dois importantes aspectos. Primeiro, Modelica é uma linguagem de modelagem e não uma verdadeira linguagem de programação. Classes escritas em Modelica não são compiladas, no sentido usual da palavra, mas sim traduzidas em objetos que podem ser utilizados em sistema de simulação. O sistema de simulação não é específico da linguagem, embora certas capacidades necessárias sejam delineadas pela linguagem (ALEX J. ; OGUREK, 2005).

O modelo ASM1, originário da linguagem Modelica, apresenta os principais equipamentos necessários para a configuração e simulação de sistemas de tratamentos de efluentes por lodos ativados, e que foram convertidos para a linguagem do EMSO.

4.2 APRESENTAÇÃO DO SIMULADOR EMSO

O *software* utilizado para a implementação do modelo ASM1 foi o simulador de processos EMSO (*Environment for Modeling Simulation and Optimization*) que utiliza a abordagem baseada em equações. O EMSO, faz parte do projeto ALSOC (Ambiente Livre para Simulação, Otimização e Controle), o qual se propõe a desenvolver continuamente um ambiente integrado de síntese, modelagem, simulação, controle e otimização de processos (disponível em: <<http://www.enq.ufrgs.br/alsoc>>).

O EMSO foi desenvolvido com o objetivo de apresentar um novo simulador genérico para processos dinâmicos que satisfaça os usuários, tanto acadêmicos, quanto de profissionais da indústria (SOARES, 2003).

O EMSO pode ser usado em simulações estacionárias e dinâmicas, na estimação de parâmetros, reconciliação de dados, otimização estacionária e dinâmica, dentre outros. Sua interface gráfica facilita a comunicação com o usuário, tornando-o ágil e de fácil manuseio.

Todos os modelos são implementados em uma linguagem de modelagem simples, que podem ser inspecionados e editados livremente pelo usuário (SOARES, 2003).

O EMSO apresenta características que o tornam flexível em várias aplicações, tais como:

4.2.1 LINGUAGEM DE MODELAGEM

- Apresenta uma interface amigável, de fácil entendimento, de maneira que se possa utilizar vários modelos ao mesmo tempo e, de maneira análoga, visualizar resultados na forma de gráficos;
- Foi escrito na linguagem C ++, esta possui um alto nível de utilização de conceitos derivados da programação orientada a objetos (*Object-oriented programming* - OOP), tais como a composição e herança (BICCA, 2006).
- A composição: permite que na construção de um modelo, este seja composto de um ou mais sub-modelos pré-existentes. Pode-se criar um modelo para o reator e outro para os decantador secundário e o aerador e combiná-los ao modelo final do sistema de tratamento de efluentes através da composição (BICCA, 2006).
- A herança: é dita como a reutilização do código, pois através desta, é possível obter diferentes tipos de modelos derivados de um modelo já existente. Assim quando se quer criar um novo modelo, este pode herdar todas as características do modelo existente através da herança (BICCA, 2006).

O simulador de processos EMSO apresenta uma linguagem de modelagem descritiva, composta por dois componentes principais: **Model** e **FlowSheet**.

4.2.1.1 MODEL

De acordo com Bicca (2006), um Model é basicamente a abstração matemática de um dispositivo ou equipamento, parte de um processo ou *software*.

Cada Model pode ser composto por parâmetros, variáveis, equações, condições iniciais, condições de fronteira e Models internos (Modelagem por hierarquia ou composição).

Models podem ser baseados em outros pré-existentes e novas características podem ser adicionadas, tais como, equações, variáveis entre outros parâmetros.

Sendo assim os principais conceitos do paradigma orientado a objetos de composição e herança são contemplados pela linguagem.

4.2.1.2 FLOWSHEET

É constituído por um conjunto de componentes, chamados *Devices*. Um *Device* é definido como a instância de um *Model* e representa uma peça real do processo em análise.

Desta forma, um único *Model* pode ser utilizado como base para diversos *Devices* os quais tem a mesma estrutura, mas diferem em alguns aspectos (valores dos parâmetros, conexões ou especificações) (BICCA, 2006).

O componente *FlowSheet* contém todas as especificações de um processo através de um conjunto de modelos definidos na seção *DEVICES* ligados entre si na seção *CONNECTIONS*. Em sistemas dinâmicos, as condições iniciais são definidas na seção *INITIAL*. Na seção *SET*, são atribuídos valores às constantes e a seção *SPECIFY* é usada para remover os graus de liberdade do sistema especificando valores para variáveis.

A estruturação de um *FlowSheet* também está baseada nos conceitos de composição e herança de *Models* internos, dentro do mesmo arquivo, ou referenciando-se a *Models* em arquivos externos utilizando o comando *using* (SOARES, 2003).

Um exemplo de *FlowSheet* pode ser observado no Anexo 2.

4.2.2 ESTRUTURA BASEADA EM EQUAÇÕES

Por apresentar uma estrutura baseada em equações o simulador permite que o usuário escreva as equações na forma que achar necessário.

Nenhum tratamento especial é necessário para a ordem em que as equações aparecem nos modelos e a expressão de igualdade pode ser escrita diretamente, independentemente de qual a variável que se deseja determinar.

O simulador converte o sistema de equações descrito nos modelos em um único sistema de equações que será solucionado diretamente (BICCA, 2006).

4.2.3 ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA

Utilizando o EMSO é possível realizar a análise de consistência das unidades de medidas, verificando se uma ou mais equações do modelo são consistentes, além de efetuar automaticamente as conversões para outros sistemas de unidades se necessário. É possível ainda, analisar a consistência dos graus de liberdade do sistema e se todos os parâmetros necessários para a simulação foram especificados (BICCA, 2006).

4.2.4 SOLVERS

São utilizados pacotes numéricos que podem servir para a resolução de sistemas de equações algébricas e/ou algébrico-diferenciais, para a solução de problemas estacionários e dinâmicos, e também para resolução de problemas de otimização e estimação de parâmetros.

4.2.5 INTERFACES EXTERNAS

O simulador EMSO contém mecanismos de interfaces que possibilitam ao usuário utilizar rotinas de cálculos externamente ao simulador, facilitando a resolução de problemas mais complexos (BICCA, 2006).

Para se obter um detalhamento mais completo das funções do simulador EMSO, recomenda-se a leitura do trabalho de Soares (2003).

4.3 INTERFACE GRÁFICA DO SIMULADOR EMSO

A interface Gráfica do simulador EMSO, apresenta-se de forma amigável, permitindo ao usuário manipular simultaneamente vários modelos, utilizando somente os parâmetros necessários e visualizar resultados na forma de gráficos.

As guias que contém o símbolo de um cadeado, são as guias que retornam os resultados.

A Figura 4 representa a interface gráfica do simulador EMSO e da biblioteca de tratamento de efluentes.

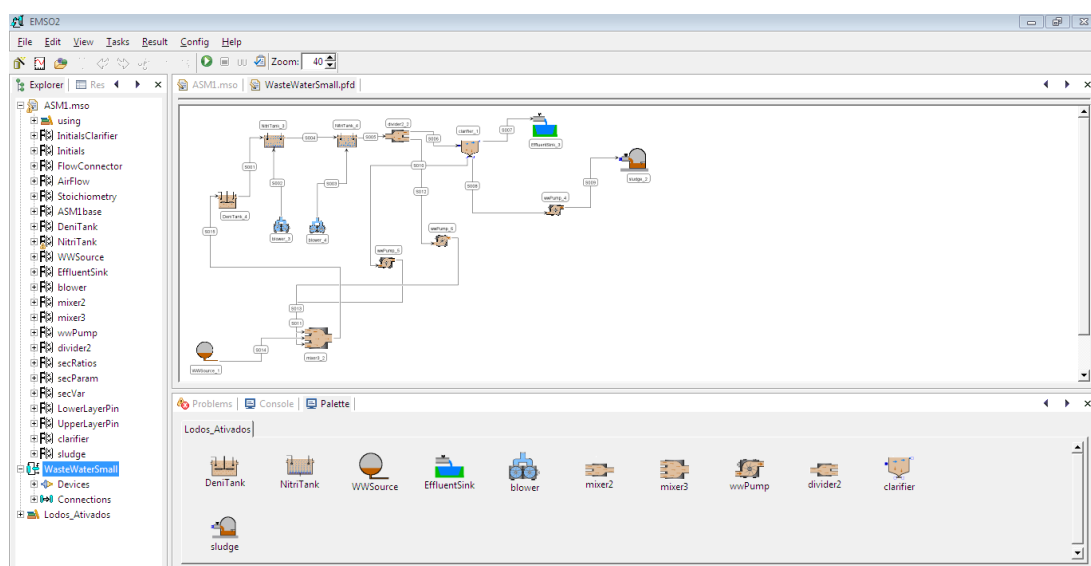


Figura 4 – Interface Gráfica do Simulador EMSO.

O simulador EMSO utiliza uma linguagem de modelagem descritiva, possibilitando ao usuário criar seus próprios modelos, sem ter necessariamente conhecimento em programação.

Na guia *Explorer* ficam agrupados os modelos criados, onde são exibidos os parâmetros de cada modelo.

A Figura 5 apresenta os parâmetros definidos para o modelo ASM1.

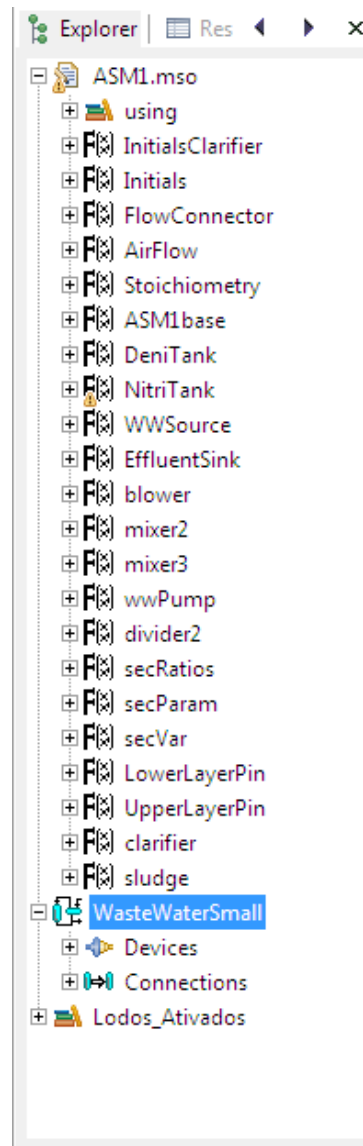


Figura 5 – Guia *Explorer*.

Na guia *Palette* estão dispostos os ícones, que representam os elementos da interface gráfica.

A Figura 6 apresenta os ícones dos elementos (equipamentos) que formam o sistema de tratamento de efluentes.

Para montar o sistema de tratamento de efluentes, o usuário precisa apenas clicar



Figura 6 – *Palette* com os ícones que formam o sistema de tratamento de efluentes.

sobre o ícone do elemento, que será automaticamente disposto no *Flowsheet*.

Após serem disposto os elementos, estes podem ser interligados através das conexões. Como pode ser observado na Figura 7

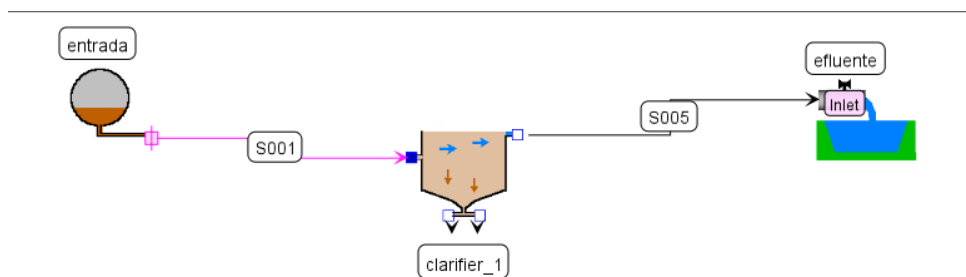


Figura 7 – Conexões entre os elementos do Sistema.

Após os ícones serem disposto no *Flowsheet* e interligados por conexões, são determinados os parâmetros de cada elemento para a realização da simulação.

Ao se iniciar a simulação, o sistema irá analisar as equações descritas e determinar os graus de liberdade do sistema. Para que a simulação ocorra é necessário que o usuário pré-determine alguns parâmetros de entrada e saída para todos os elementos a fim de manter os graus de liberdade do sistema iguais a zero.

4.3.1 DESCRIÇÃO DO ELEMENTOS DA INTERFACE GRÁFICA

A Interface Gráfica é responsável por proporcionar interação entre o usuário e o simulador por meio da tela, em forma de gráficos ou elementos.

Segue uma descrição de cada elemento com os parâmetros e fatores que influenciam na simulação do sistema de tratamento de Efluentes.

4.3.1.1 ENTRADA DE EFLUENTES

A Figura 8 apresenta o ícone de entrada e as propriedades que são inseridas pelo usuário, as unidades são pré-definidas e os valores são editáveis.

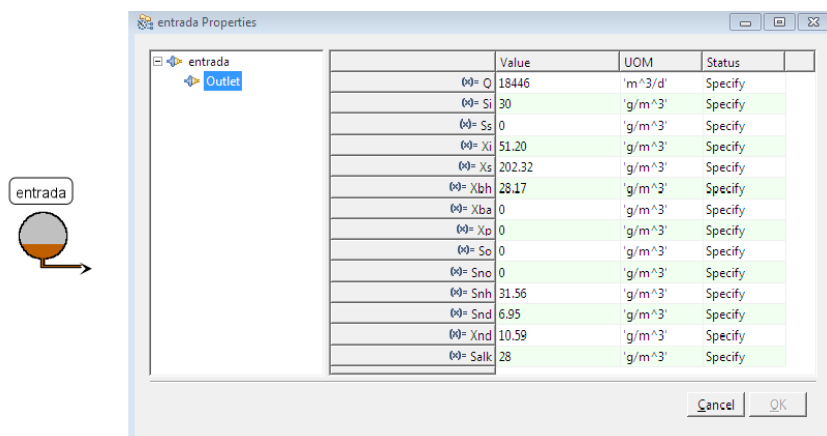


Figura 8 – Propriedades de Entrada dos Efluentes.

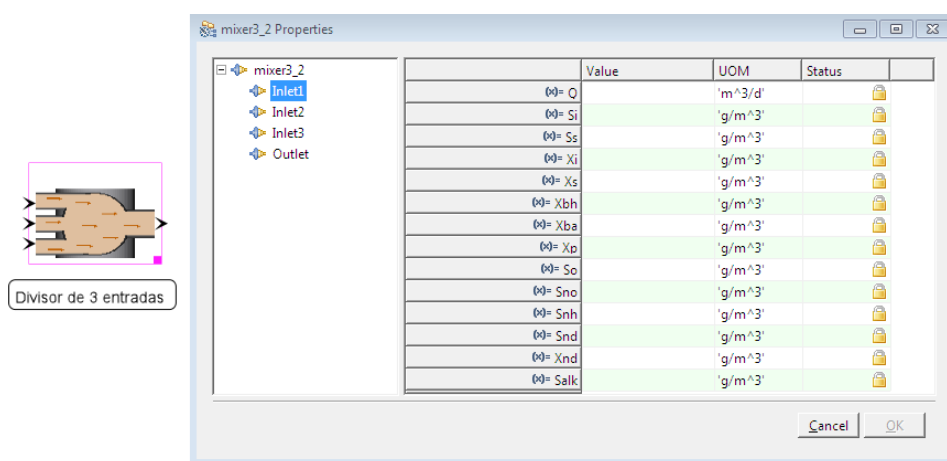


Figura 9 – Misturador de três entradas.

4.3.1.2 MISTURADOR DE TRÊS ENTRADAS

A Figura 9 apresenta uma janela de dialogo do simulador com o usuário.

O misturador de 3 entradas possibilita a entrada do efluente e o reciclo, no sistema.

4.3.1.3 DIVISOR DE DUAS ENTRADAS

A Figura 10, ilustra um divisor de 2 saídas, possibilitando a separação do efluente que segue o fluxo do sistema e o lodo para o reciclo.

4.3.1.4 TANQUE MISTURADOR

A Figura 11 ilustra um tanque com um misturador anexado, neste tanque acontece a homogeneização do efluente. O tanque apresenta uma entrada e uma saída, pode-se observar que nesta etapa o usuário não tem permissão para editar as propriedades do efluente, somente a condição inicial.

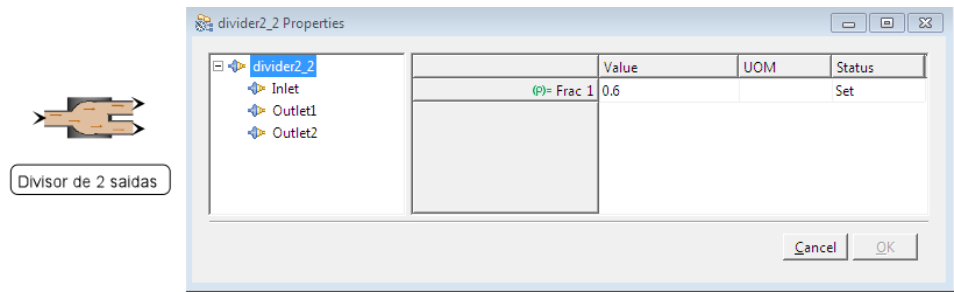


Figura 10 – Divisor de 2 saídas.

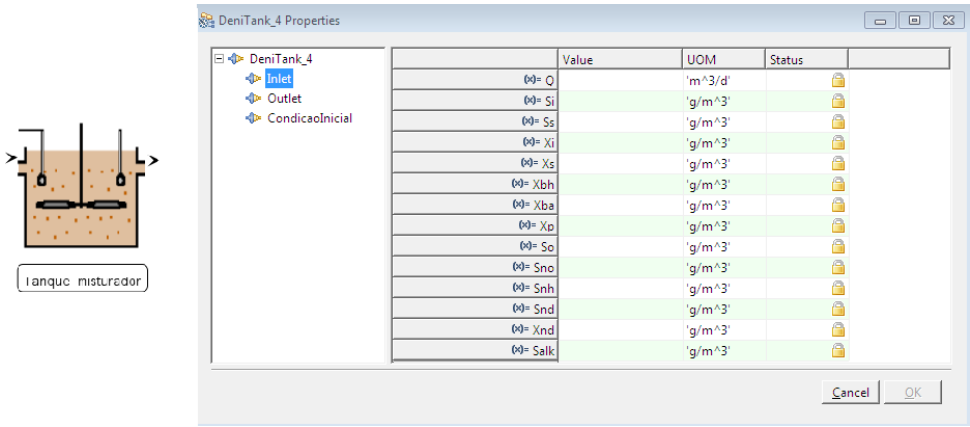


Figura 11 – Tanque Misturador.

4.3.1.5 TANQUE AERADO

A Figura 12 apresenta o tanque com aeração, nesta ocorre o crescimento do lodo. o tanque uma entrada para o efluente, uma entrada para aeração e uma saída de efluente. Neste tanque ocorrem as reações biológicas.

Os parâmetros de entrada e saída não podem ser modificadas pelo usuário, somente as condições iniciais.

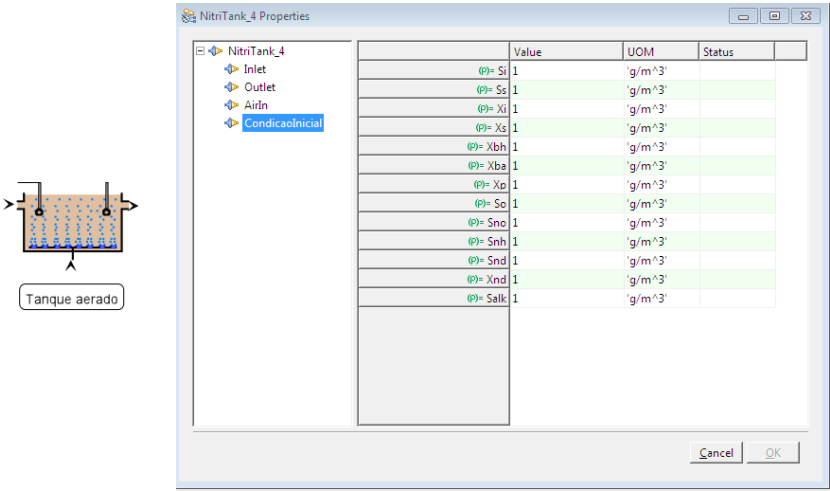


Figura 12 – Tanque com aeração.

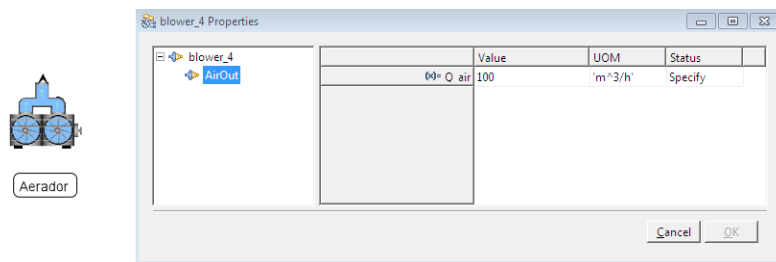


Figura 13 – Aerador.

4.3.1.6 AERADOR

A Figura 13 apresenta um aerador, responsável pelo fornecimento do oxigênio necessário ao desenvolvimento das reações biológicas no sistema de tratamento de efluentes.

4.3.1.7 DECANTADOR

A Figura 14 ilustra o decantador, tem como função sedimentar os sólidos existentes no meio líquido. Os sólidos sedimentáveis uma parte retorna para o sistema através do reciclo e a outra é descartada. O sobrenadante (efluente tratado) é descarregado para um corpo receptor no meio ambiente.

O decantador apresenta uma entrada para efluentes e três saídas, sendo uma para o reciclo, uma para o descarte do lodo e outra para o efluente tratado.

Os parâmetros de entrada e saída não podem ser modificadas pelo usuário, somente as condições iniciais e as frações.

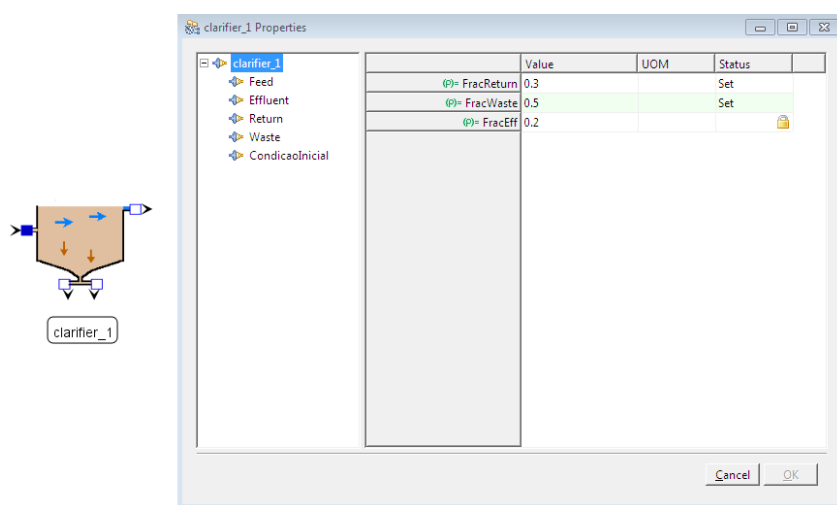


Figura 14 – Decantador.

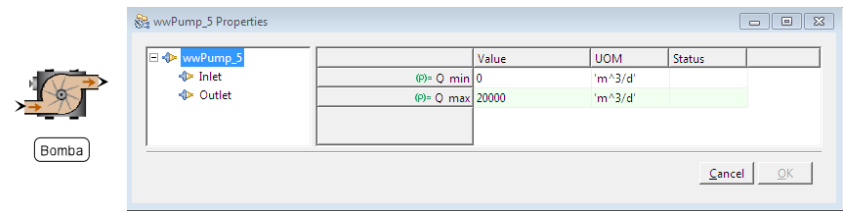


Figura 15 – Bomba.

4.3.1.8 BOMBA

A Figura 15 é utilizada para realizar o escoamento dos efluentes.

O usuário pode alterar a vazão de entrada e de saída do efluente.

4.3.1.9 EFLUENTES

A Figura 16, apresenta o efluente já tratado, pronto para ser disposto no meio ambiente.

Os parâmetros não podem ser modificados pelo usuário.

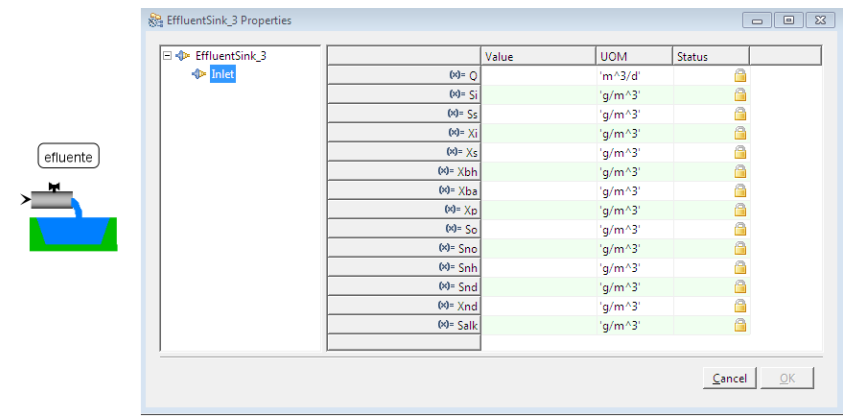


Figura 16 – Sobrenadante - Efluentes Tratados.

4.3.1.10 LODO

A Figura 17 representa descarte de lodo do sistema, isso ocorre em função da produção contínua de lodo no tanque de aeração (crescimento microbiológico).

Assim como acontece no efluente tratado, o usuário não tem permissão para alterar os parâmetros de saída.

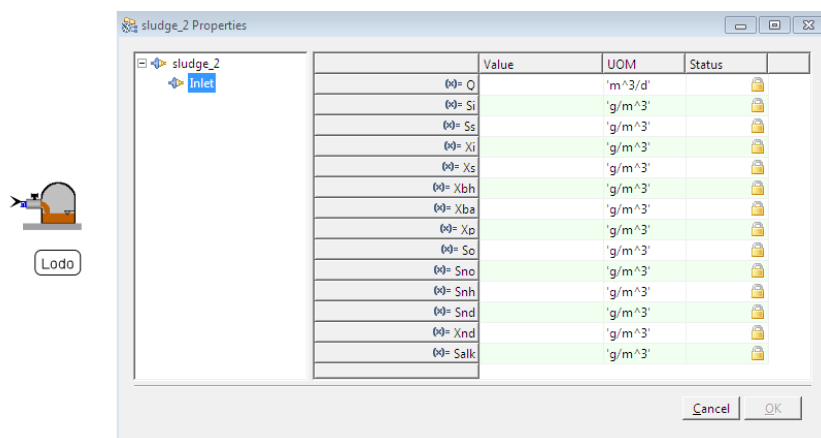


Figura 17 – Descarte de lodo do sistema.

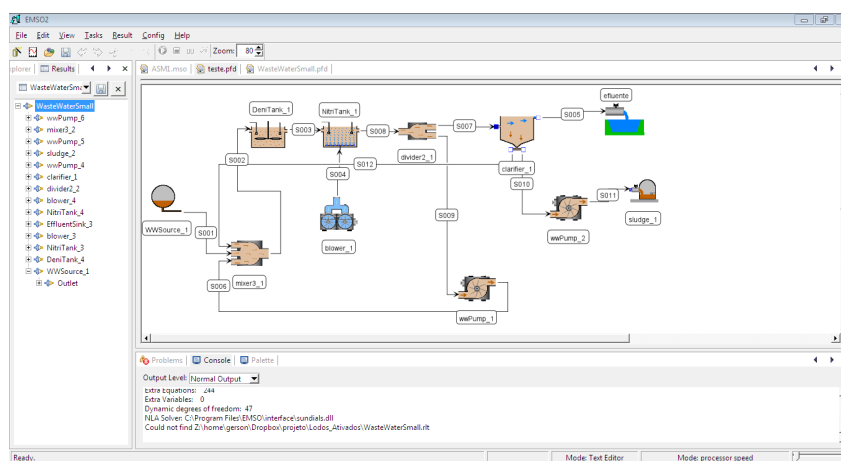


Figura 18 – Resultados da simulação de uma planta de pequeno porte.

4.3.2 SISTEMA CONSIDERADO PARA A SIMULAÇÃO

O sistema considerado para a simulação, foi uma planta de pequeno porte, que consiste em uma corrente de entrada, dois divisores um com uma e outro com duas entradas, um tanque misturador, um reator (tanque de aeração), um decantador, um aerador, duas bombas, duas correntes de saída, sendo uma para efluente tratado e outra para o descarte.

Após determinar todas as variáveis necessárias, e suas respectivas considerações o usuário deve clicar no botão *Run*, para o simulador realizar as análises de consistência.

Se o simulador encontrar algum erro, nas variáveis ou graus de liberdade, este erro será indicado na guia *Problems*, para que o usuário possa corrigi-los, e então ocorra a simulação.

Ao término da simulação, o simulador apresenta os resultados na guia *Results* que se encontra à esquerda na tela do simulador.

A Figura 18 apresenta a tela do simulador com a configuração de uma planta de tratamento de pequeno porte.

5 CONCLUSÃO

De acordo com a revisão bibliográfica realizada, pode-se observar que a simulação dinâmica apresenta-se como uma ferramenta de relevante importância no projeto. Através desta, o usuário pode compreender as interações complexas, entre as diversas unidades do processo de forma não intrusiva, interativa e dinâmica. E auxilia-lo na projeção, operação, otimização e controle das plantas de tratamento de efluentes.

Em vista disso, este trabalho buscou contribuir com o desenvolvimento de modelos para tratamento de efluentes utilizando o paradigma da programação orientada a objetos disponíveis no simulador de processos EMSO . Nos parágrafos que seguem, são feitas as considerações finais a respeito deste trabalho.

No Capítulo 2, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os sistemas de tratamento de efluentes existentes, com destaque para os sistemas aeróbicos por lodos ativados. Foi descrito a funcionalidade do sistema por lodos ativados e suas variações, citando suas vantagens e desvantagens, e ressaltado as legislações vigentes para o tratamento de efluente. Ainda no Capítulo 2 foi realizado uma revisão bibliográfica sobre simulação para sistemas de tratamentos, e os principais *softwares* disponíveis no mercado.

No Capítulo 3, foi abordado os modelos matemáticos da família ASM, elaborados pela *International Water Association* (IWA), com objetivo de desenvolver modelos práticos capazes auxiliar na projeção, operação, otimização e controle dos sistemas de tratamentos por lodos ativados. Foi realizado uma revisão sucinta sobre o modelo ASM1, descrevendo seus componente de caracterização, seus parâmetros cinéticos e estequiométricos, os processos que ocorrem no modelo ASM1 e suas limitações, e ainda foram citados os modelos ASM2, ASM2d e ASM3.

No Capítulo 4, foi proposto a implementação do modelo ASM1 no simulador de processos EMSO, sendo realizado uma revisão bibliográfica, tratando da linguagem modelica, que foi convertida para a linguagem do EMSO. Ainda no Capítulo 4, foi apresentado os componentes, características e fatores que afetam o funcionamento do EMSO. Ficou claro que é possível criar interfaces amigáveis ao usuário devido ao EMSO apresentar um ambiente integrado de síntese, modelagem, simulação, controle e otimização de processos, com características de modularidade, reutilização e interfaceamento padrão.

Por fim, este trabalho buscou trazer mais informações a respeito do modelo ASM1, uma vez que a implementação do modelo no EMSO ainda não está totalmente funcional. O primeiro passo para o entendimento do modelo foi realizado. Esta revisão contribuiu para mostrar as principais características da biblioteca e de como configurar um sistema de tratamento de efluentes por lodo ativado, apenas selecionando e conectando os equipamentos.

Como sugestão para a continuidade do trabalho, é a busca por um estudo de caso que possa validar os modelos da biblioteca. As tentativas em simular uma planta pequena recorreram em erros numéricos e isto se deve ao fato de que é necessário um tempo maior para os ajustes dos modelos.

Ressalta-se que a idéia principal deste trabalho foi a de melhorar uma biblioteca pública de código aberto já existente no EMSO. Espera-se que o simulador e a biblioteca de modelos contribuam para o ensino, pesquisa e o desenvolvimento da engenharia no âmbito dos processos de tratamento de efluentes.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, J. Tratamento aeróbico x anaeróbico. In: . [s.n.], 2011. Disponível em: <<http://jorcyaguiar.blogspot.com.br/2011/05/tratamento-aerobico-x-anaerobico.html>>.
- ALBERTE, T. **Estudo do tratamento de águas residuárias por lodos ativados em reator “Air-Lift” de tubos concêntricos**. Tese (Tese Doutorado em Engenharia de Alimentos) — Doutorado em Engenharia de Alimentos - Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- ALEX J. ; OGUREK, M. J. U. Formalised model representation for wastewater systems. **IFAC**, 2005. Disponível em: <<http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/ifac2005/Fullpapers/02002.pdf>>.
- BICCA, G. B. **Modelagem Hierárquica de trocadores de Calor Casco e Tubos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Química, 2006.
- DAVID, R.; VANDE A., V. J.-L. Q. I. Robust control of the activated sludge process. **American Institute of Chemical Engineers Biotechnol**, v. 25, n. 3, p. 701–708, 2009.
- FARRUGIA, B. **Sistemas biológicos para tratamento de efluentes**. [S.l.], 2012. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/noticiaInt.asp?id=3671>>.
- FERREIRA, F. **Modelação e Gestão Integrada de Sistemas de Águas Residuais**. Tese (Doutorado) — Instituto Superior Técnico - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006.
- GABALDÓN C.; FERRER, J. S. A. M. P. A software for the integrated design of wastewater treatment plants. **Environmental Modelling & Software**, p. 31–44, 1998.
- GERNAEY K., V. L. M. H. M. L. M. J. S. B. . Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: State of the art. In: **Environmental Modelling e Software 19**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 763–783.
- HENZE M., G. W. M. T. L. M. **Activated Sludge Models ASM1,ASM2,ASM2d and ASM3**. IWA Publishing in its Scientific and Technical Report series, 2000. Disponível em: <http://www.iwapublishing.com/pdf/contents/isbn1900222248_contents.pdf>.
- HENZE M.; GRADY, C. P. L. J. G. W. M. G. V. R. M. T. **Activated Sludge Model No. 1**. [S.l.], 1987.
- KHU S.-T., F. d. P. D. S. S. D. G. W. Incorporating spatial and temporal information for urban drainage model calibration: An approach using preference ordering genetic algorithm. In: **Advances in Water Resources 29 (8)**. [S.l.]: August, 2006. p. p. 1168–1181.
- KOSER, M. **Avaliação do desempenho do tratamento de efluente sanitário utilizando sistema de lodos ativados de fluxo contínuo e aeração intermitente**. Dissertação (Mestrado) — Dissertação em Engenharia de Processos - Universidade da Região de Joinville., 2012. Disponível em: <http://univille.edu.br/community/mestrado_ep/VirtualDisk.html?action=downloadFile&file=Dissertacao_Marcia_Koser.pdf¤t=%2FDissertacoes_Turma_IV>.

LEVY, . A. L. L. **Modelagem e Análise de Sensibilidade do Processo de Tratamento de Lodos Ativados com Reciclo**. Dissertação (Mestrado) — Dissertação em Engenharia Química, 2007 - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.

POMBO, S. C. M. A. **Contributo para a Utilização de Modelos de Simulação Dinâmica no Dimensionamento de Processos de Lamas Activadas**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010. Disponível em: <http://run.unl.pt/bitstream/10362/6101/1/Pombo_2011.pdf>.

RAMALHO, R. S. **Introdution to Wastewater Treatement Processes**. [S.l.]: 2 edição, 1983.

SOARES, R. d. P. **Desenvolvimento de simulador genérico de procesos dinâmicos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Química, 2003.

SPERLING, M. V. **Princípios do tratamento biologicosgico de águas residuárias. Vol. 4. Lodos Ativados**. [S.l.]: Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitaria e Ambiental – UFMG, 1997.

Anexos

ANEXO A – ANEXO 1

A.1 NOTAÇÃO MATRICIAL DO MODELO ASM1.

Component	Process	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Process Rate, ρ_i [$ML^{-3}T^{-1}$]
j	i	S_i	S_b	X_i	X_b	$X_{b,H}$	$X_{b,A}$	X_p	S_o	S_{no}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	S_{ALK}	
1	Aerobic growth of heterotrophs		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1}{Y_H}$		$-i_{NH}$			$-\frac{i_{NH}}{14}$	$\mu_H \left(\frac{S_b}{K_S + S_b} \right) \left(\frac{S_o}{K_{O,H} + S_o} \right) X_{b,H}$
2	Anoxic growth of heterotrophs		$-\frac{1}{Y_H}$			1				$-\frac{1}{Y_H} - \frac{2.86}{14}$	$-i_{NH}$			$-\frac{i_{NH}}{14}$	$\mu_H \left(\frac{S_b}{K_S + S_b} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_o} \right) \times \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_a X_{b,H}$
3	Aerobic growth of autotrophs					1			$-\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{NH} - \frac{1}{Y_A}$			$-\frac{i_{NH}}{14} - \frac{1}{7Y_A}$	$\mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_o}{K_{O,A} + S_o} \right) X_{b,A}$
4	'Decay' of heterotrophs				$1 - f_p$	-1		f_p					$i_{NH} - f_p i_{XP}$		$b_H X_{b,H}$
5	'Decay' of autotrophs				$1 - f_p$		-1	f_p					$i_{NH} - f_p i_{XP}$		$b_A X_{b,A}$
6	Ammonification of soluble organic nitrogen										1	-1		$\frac{1}{14}$	$k_{SND} X_{b,H}$
7	'Hydrolysis' of entrapped organics		1		-1										$k_h \frac{X_p/X_{b,H}}{K_X + (X_p/X_{b,H})} \left[\left(\frac{S_o}{K_{O,H} + S_o} \right) + \eta_b \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_o} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{b,H}$
8	'Hydrolysis' of entrapped organic nitrogen											1	-1		$\rho_i (X_{ND}/X_b)$
$r_i = \sum_j u_{ij} \rho_j$															
Stoichiometric Parameters:															
Heterotrophic yield: Y_H															
Autotrophic yield: Y_A															
Fraction of biomass yielding particulate products: f_p															
Mass N/Mass COD in biomass: i_{NH}															
Mass N/Mass COD in products from biomass: i_{XP}															
Soluble inert organic matter [$M(COD)L^{-3}$]															
Readily biodegradable substrate [$M(COD)L^{-3}$]															
Particulate inert organic matter [$M(COD)L^{-3}$]															
Slowly biodegradable substrate [$M(COD)L^{-3}$]															
Active heterotrophic biomass [$M(COD)L^{-3}$]															
Active autotrophic biomass [$M(COD)L^{-3}$]															
Particulate products arising from biomass decay [$M(COD)L^{-3}$]															
Oxygen (negative COD) [$M(-COD)L^{-3}$]															
Nitrate and nitrite nitrogen [$M(N)L^{-3}$]															
$NH_4^+ + NH_3$ nitrogen [$M(N)L^{-3}$]															
Soluble biodegradable organic nitrogen [$M(N)L^{-3}$]															
Particulate biodegradable organic nitrogen [$M(N)L^{-3}$]															
Alkalinity – Molar units															
Kinetic Parameters:															
Heterotrophic growth and decay:															
Autotrophic growth and decay:															
Correction factor for anoxic growth of heterotrophs: η_a															
Ammonification: k_h															
Hydrolysis: k_h , K_X															
Correction factor for anoxic hydrolysis: η_b															

Figura 19 – Notação matricial do modelo ASM1.

Fonte: HENZE M.; GRADY (1987)

ANEXO B – ANEXO 2

B.1 EXEMPLO DE UM FLOWSHET

Código B.1 – Exemplo de FlowSheet.

```
#*-----
* FlowSheet generated automaticaly by EMSO-GUI
*-----*#
```

```
using "ASM1";
```

```
FlowSheet WasteWaterSmall
```

DEVICES

```
EffluentSink_3 as EffluentSink;
NitriTank_4 as NitriTank;
blower_4 as blower;
WWSource_1 as WWSource;
DeniTank_4 as DeniTank;
```

SPECIFY

```
WWSource_1.Outlet.Q = 10000 * 'm^3/d';
WWSource_1.Outlet.Si = 1e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.Ss = 64e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.Xi = 40e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.Xs = 160e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.Xbh = 20e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.Xba = 1e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.Xp = 40e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.So = 1e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.Sno = 1e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.Snh = 12.5e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.Snd = 10.1e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.Xnd = 18.8e-3 * 'g/l';
WWSource_1.Outlet.Salk = 7e-3 * 'mol/l';
```

INITIAL

```
DeniTank_4.Outlet.Si = 6.43468e+07 * 'g/m^3';
DeniTank_4.Outlet.Ss = 2.02889e+09 * 'g/m^3';
DeniTank_4.Outlet.Xi = 127.831 * 'g/m^3';
DeniTank_4.Outlet.Xs = 2.01362 * 'g/m^3';
DeniTank_4.Outlet.Xbh = 8.30622e+07 * 'g/m^3';
DeniTank_4.Outlet.Xba = 4.40812 * 'g/m^3';
DeniTank_4.Outlet.Xp = 505992 * 'g/m^3';
DeniTank_4.Outlet.So = 1.47366e+07 * 'g/m^3';
```

```
DeniTank_4.Outlet.Sno = 6.17438e+07 * 'g/m^3';  
DeniTank_4.Outlet.Snh = 6.10642e+08 * 'g/m^3';  
DeniTank_4.Outlet.Snd = 171.986 * 'g/m^3';  
DeniTank_4.Outlet.Xnd = 0.177729 * 'g/m^3';  
DeniTank_4.Outlet.Salk = 145648 * 'mol/l';
```

CONNECTIONS

```
DeniTank_4.Outlet to NitriTank_3.Inlet;  
blower_3.AirOut to NitriTank_3.AirIn;  
NitriTank_3.Outlet to NitriTank_4.Inlet;  
blower_4.AirOut to NitriTank_4.AirIn;  
NitriTank_4.Outlet to divider2_2.Inlet;  
divider2_2.Outlet1 to clarifier_1.Feed;  
clarifier_1.Effluent to EffluentSink_3.Inlet;  
clarifier_1.Waste to wwPump_4.Inlet;  
wwPump_4.Outlet to sludge_2.Inlet;  
clarifier_1.Return to wwPump_5.Inlet;  
wwPump_5.Outlet to mixer3_2.Inlet3;  
divider2_2.Outlet2 to wwPump_6.Inlet;  
wwPump_6.Outlet to mixer3_2.Inlet1;  
WWSource_1.Outlet to mixer3_2.Inlet2;  
mixer3_2.Outlet to DeniTank_4.Inlet;
```

OPTIONS

```
Dynamic = true;  
TimeStep = 0.1;  
TimeEnd = 14;  
TimeUnit = 'd';
```

end
